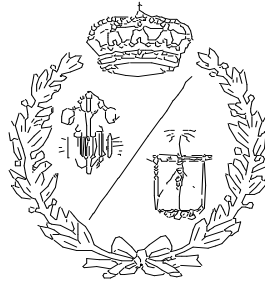


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Grado

**Diseño y análisis estructural (FEM) de
depósito elevado de agua
(Design and structural analysis(FEM) of
elevated water tank)**

Para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Autor: Adrián Fernández Gutiérrez

09 – 2020

En este trabajo se mostrará una serie de datos que justifiquen la utilidad y, por ende, la necesidad de la construcción de dicha estructura. Por otra parte, se realizarán los cálculos necesarios apoyándose en distintas normas. Una vez hecho esto se simularán las ecuaciones de las solicitaciones en la estructura en un programa de elementos finitos y se realizarán los planos, el presupuesto y el pliego de condiciones técnicas.

A lo largo de dicho trabajo se han realizado estudios de crecimiento demográfico, estudio geográficos e hidrogeológicos y se ha llegado a la conclusión de que, debido a una geografía plana, un aumento de la población y la disponibilidad de agua, estas mismas llevan a la construcción de un depósito de agua elevado para la distribución de agua potable a un pequeño núcleo rural.

Las dimensiones del depósito tendrán en cuenta, entre otros, las condiciones de consumo, las condiciones climáticas del entorno y las condiciones de diseño para que aguante las solicitaciones a las que esté sometida la estructura. Para su diseño estructural, se obtendrán las ecuaciones de las solicitaciones a las que estará sometido el depósito a través de la norma española de estructuras UNE-EN 1991-1-4 eurocódigo acciones en estructuras y la norma sismorresistente NCSE-02, NCSP-07, EUROCODE-8, ACI-350.

Por otra parte, las solicitaciones a las que estará sometido serán: presión hidrostática en pared y base, presión ejercida por el viento en pared, presiones hidrodinámicas generadas por el sismo en pared y base, presión de la nieve en la tapa; además, cabe destacar que la acción del sismo y el viento dependerá de la dirección de aplicación por lo que a la hora de realizar la simulación final tendremos que tener en cuenta si la dirección de estas solicitación son coincidentes, opuestas, etc.. Dicha simulación se llevará a cabo mediante softwares de elementos finitos, en este caso *Nastran* y *Patran*, con el objetivo de comprobar y optimizar dicho diseño estructural. También se utilizará *Matlab* para representar las ecuaciones.

Asimismo, se empleará el software *Autodek Inventor Professional* en el que se realizará el ensamblaje de las piezas, los planos y la vista, y el vídeo en explosión de la estructura.

In this work, a series of data is shown which justifies the use and, therefore, the need for the construction of the structure. On the other hand, the necessary calculations are conducted based on different standards. Once this first part of the project is concluded, the equations of the solicitations are simulated in the structure in a finite element program, through which the plans, the budget and the technical specifications are created.

Throughout this work, studies of demographic growth and geographic and hydrogeological studies have been carried out and it has been decided that due to a flat geography, an increase in population and the availability of water leads to the construction of an elevated water tank for the distribution of drinking water to a small rural nucleus.

The dimensions of the tank are determined because of the consumption conditions, the climatic conditions of the environment and the design conditions among others, so that it can withstand the stresses to which the structure is subject. For its structural design, the equations of the solicitations to which the deposit is exposed are obtained through the Spanish standard for structures UNE-EN 1991-1-4 Eurocode actions on structures and the seismic resistant standard NCSE-02, NCSP-07, EUROCODE-8, ACI-350.

Furthermore, the stresses to which it is subject to are the following: hydrostatic pressure on the wall and base, pressure exerted by the wind on the wall, hydrodynamic pressures generated by the earthquake on the wall and base and pressure of the snow on the cover. Moreover, it should be noted that the action of the earthquake and the wind depend on the direction of application, so when making the final simulation it must be considered whether the direction of these solicitations are coincident, opposite, etc. Said simulation is achieved by using Finite Element Software -Nastran and Patran- in order to check and optimize said structural design. Besides, Matlab is used to represent the equations.

The Autodek Inventor Professional Software is also used in the assembly of the parts, the plans and the exploded view and the video of the structure.

ÍNDICE

1. OBJETIVO
2. INTRODUCCIÓN
 - 2.1 TIPOLOGÍAS DE DEPÓSITOS
 - 2.2 RECOMENDACIONES DE DISEÑO
 - 2.3 ESTUDIO DE CRECIMIENTO DEMOGRÁFICO Y GEOGRÁFICO
 - 2.4 POSIBLES FALLOS ESTRUCTURALES
3. MEMORIA DESCRIPTIVA
 - 3.1 TEORÍA DE LÁMINAS
 - 3.1.1 TEORÍA MENBRANAL
 - 3.1.2 TEORÍA DE FLEXIÓN
 - 3.2 DATOS PARA LA SIMULACIÓN
 - 3.3 UNIDADES DE MEDIDA EN EL ANÁLISIS DE MEF (cálculos)
 - 3.4 MATERIALES A ELECCIÓN
4. ANEXO DE CÁLCULOS
 - 4.1 SIMULACIÓN MEF DEL RECIPIENTE DE AGUA (elementos 1D Beam y 2D Shell)
 - 4.1.1 CREACIÓN DE LA GEOMETRÍA
 - 4.1.2 CREACIÓN DEL MALLADO ``MEF``
 - 4.1.3 CREACIÓN DE PROPIEDADES Y MATERIALES DE ELEMENTOS
 - 4.1.3.1 ELEMENTOS SHELL
 - 4.1.3.2 ELEMENTOS BEAM
 - 4.1.4 DEFINICIÓN DE CARGAS Y RESTRICCIONES
 - 4.2 OBTENCIÓN DE ECUACIONES DE SOLICITACIONES
 - 4.2.1 PRESIÓN HIDROSTÁTICA PAREDES Y BASE
 - 4.2.2 HISTÓRICO DE VIENTOS DE LA ZONA
 - 4.2.3 CÁLCULO DE ECUACIÓN DE PRESIÓN DEL VIENTO SOBRE EL CILINDRO
 - 4.2.4 REPRESENTACIÓN GRÁFICA ECUACIONES
 - 4.2.5 SIMULACIÓN MEF RECIPIENTE DE AGUA ACCIONES DEL VIENTO
 - 4.2.6 GRÁFICA FINAL VARIACIÓN DE PRESIÓN
 - 4.2.7 PRESIONES PAREDES DEBIDAS AL SEÍSMO
 - 4.2.8 EFECTOS DE UN SISMO SOBRE LOS DEPÓSITOS
 - 4.2.9 MODELOS MECÁNICOS PARA ANÁLISIS SÍSMICO DE DEPÓSITOS
 - 4.2.10 PERIODOS PROPIOS IMPULSIVOS CONVETIVOS (periodo propio del modo impulsivo en depósitos elevados y periodo propio del modo convectivo en depósitos elevados)
 - 4.2.11 CÁLCULO DE CARGAS (TANQUE LLENO)
 - 4.2.12 CÁLCULO DE CARGAS (TANQUE VACÍO)
 - 4.2.13 SIMULACIÓN MEF RECIPIENTE DE AGUA ACCIONES SISMO
 - 4.2.14 PRESIÓN TECHO DEBIDA A LA NIEVE
 - 4.3 SIMULACIÓN MEF Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS
5. PLANOS
6. AISLAMIENTO TÉRMICO

- 7. PLIEGO DE CONDICIONES
- 8. PRESUPUESTO
- 9. BIBLIOGRAFÍA
- 10. GLOSARIO, UNIDADES Y RESULTADOS
- 11. ÍNDICES
 - 11.1 ÍNDICES DE FIGURAS
 - 11.2 ÍNDICES DE IMÁGENES
 - 11.3 ÍNDICE FUNCIONES NASTRAN Y PATRAN

Los depósitos elevados se emplean cuando no es posible hallar una cota adecuada para situar un depósito enterrado, semienterrado o de superficie, siendo característicos de pequeños municipios ubicados en zonas planas.

Una alternativa bastante utilizada es combinar un depósito elevado con otro regulador, dado que los depósitos elevados pueden llegar a contener únicamente hasta un 4 – 8% del volumen de regulación requerido.

1 OBJETIVO

Este trabajo hecho con la supervisión y dirección de los profesores Pablo García Fernández y Juan Martín Osorio San Miguel del departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Cantabria tiene como objetivo el diseño y construcción de un depósito de agua sustentado sobre una estructura metálica y capaz de poder abastecer a una población rural, es decir, el depósito tendría una capacidad suficiente para el consumo de agua de 1000 personas. El diseño se llevará a cabo con un programa de elementos finitos, en concreto con NASTRAN Y PATRAN, para lo que es necesario la obtención de las ecuaciones que definan la interacción de las cargas sobre la estructura las cuales se obtendrán de distintas normas técnicas.

2 INTRODUCCIÓN

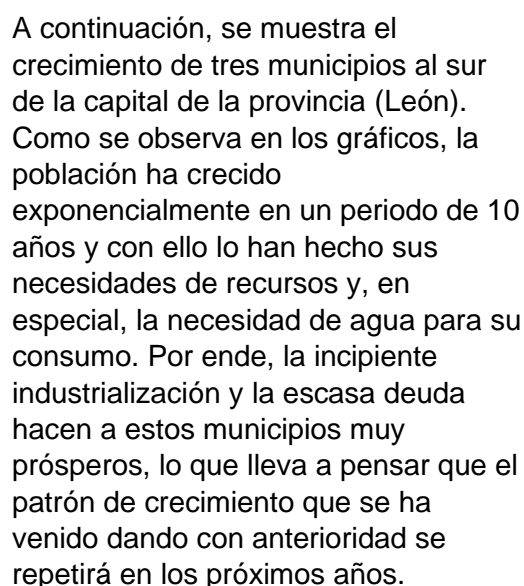
2.1 TIPOLOGÍAS DE DEPÓSITOS

1. Según su posición con respecto al terreno
 - 1.1 Enterrados
 - 1.2 Semienterrados
 - 1.3 Superficiales
 - 1.4 Elevados
2. Según su función
 - 2.1 Reguladores de caudal
 - 2.2 Reguladores de presión
 - 2.3 De seguridad en el servicio
 - 2.4 Mixtos
3. Según su relación con la red
 - 3.1 Principales, de cabecera o en serie
 - 3.2 De cola, de equilibrio, terminales o en derivación
4. Según su procedimiento constructivo
 - 4.1 Construidos *in situ*
 - 4.2 Prefabricados
5. Según su geometría
 - 5.1 Prismáticos
 - 5.2 Formas desarrollables
 - 5.3 Formas no desarrollables

2.2 RECOMENDACIONES DE DISEÑO

- Lugares bien comunicados que permitan un camino de acceso corto.
- Zonas que permitan la ampliación del depósito a igual cota.
- Viabilidad de conexión de línea eléctrica corta.
- Evitar zonas protegidas medioambientalmente.
- Evitar la orientación a laderas de población con el fin de garantizar la seguridad en caso de rotura.
- En el **caso de ciudades llanas**, si el trazado urbano lo permite, lo más práctico será construir un depósito elevado en el centro, con la posible solución ya mencionada de ubicar un depósito de regulación contiguo al elevado con el fin de garantizar la cantidad de agua necesaria para el abastecimiento.

- ## 2.3 ESTUDIO DE CRECIMIENTO DEMOGRÁFICO Y GEOGRÁFICO



Estas tres poblaciones comparten su cercanía con la capital y son un lugar de expansión urbanística e industrial de

Como se observa en el lugar de estudio, la geografía no es favorable ya que la altura mínima de la población está en torno a las 829 metros y la altura máxima es aproximadamente de 862 metros.

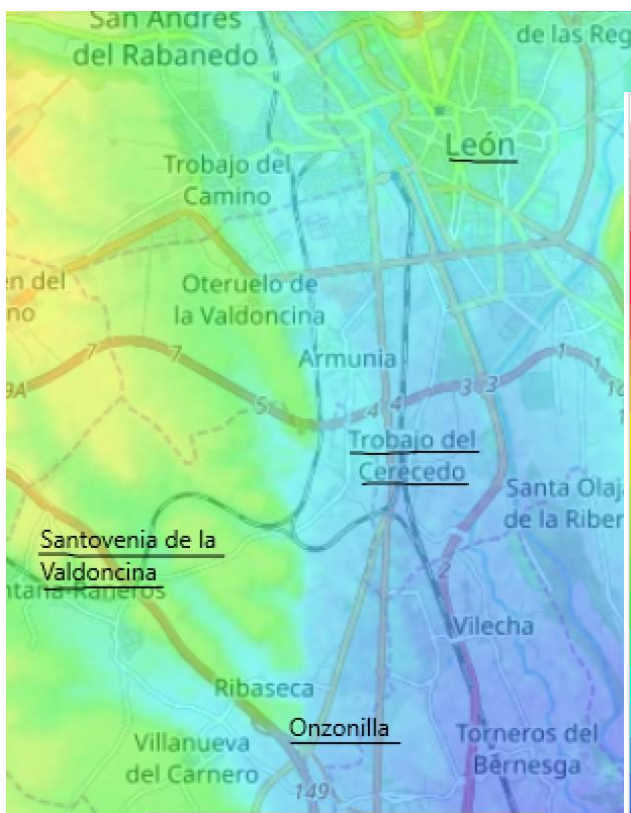


Figura 2: Mapa de altitudes afueras de León

Debido a que no es posible aprovechar el terreno para la distribución de agua, tendré que diseñar un depósito en altura el cual se sustente de una estructura. Por otra parte, la región de León tiene abundantes acuíferos subterráneos que son de la categoría A-1 (acuíferos extensos, muy permeables y productivos) y A-2 (acuíferos extensos, discontinuos y locales de permeabilidad y producción moderada) según el [mapa del año 2000 en formato JPG Mapa Hidrogeológico de España a escala 1:1.000.000](#). Son estas características las que convierten a la zona de estudio en una localización óptima para la construcción de un depósito de agua en altura.

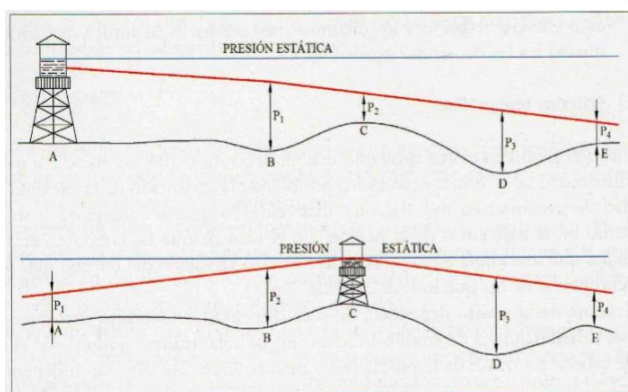


Figura 3: Disposición óptima de depósito

Ampliación a la zona exacta de estudio en la Imagen del mapa del año 2000 en formato JPG
Mapa Hidrogeológico de España a escala 1:1.000.000

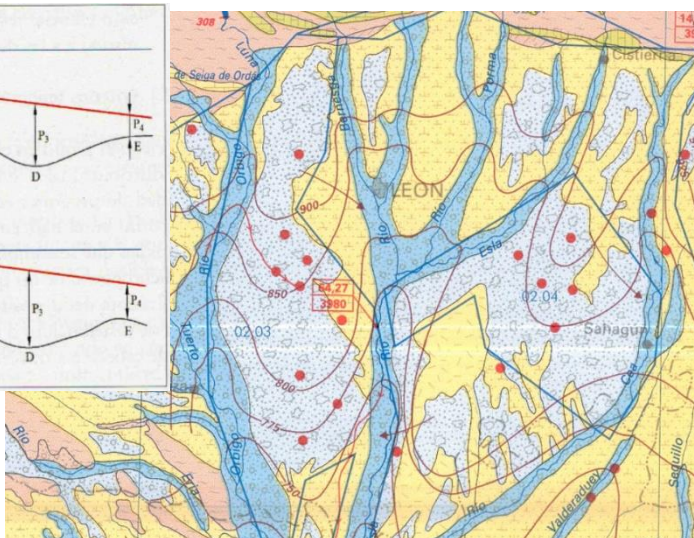


Figura 4: Mapa hidrogeológico de las afueras de León

Como se observa en el mapa hidrográfico, la Comunidad de Castilla y León es abundante en acuíferos de clase A-1 y A-2 por lo que esto justifica la disponibilidad de agua que conlleva a la construcción de depósitos para su distribución a las poblaciones que lo requieran.

DISEÑO Y ANALISIS ESTRUCTURAL (FEM) DE DEPOSITO ELEVADO DE AGUA

A: FORMACIONES DETRITICAS PERMEABLES EN GENERAL NO CONSOLIDADAS	
A-1	Acuíferos generalmente extensos, muy permeables y productivos.
A-2	Acuíferos extensos, discontinuos y locales de permeabilidad y producción moderadas. (No excluyen la existencia en profundidad de otros acuíferos cautivos y más productivos.)
B: FORMACIONES CARBONATADAS PERMEABLES POR FISURACION-KARSTIFICACION	
B-1	Acuíferos muy permeables, generalmente extensos y productivos.
B-2	Acuíferos extensos, discontinuos y locales, de permeabilidad y producción moderadas. (No excluyen la existencia en profundidad de otros acuíferos cautivos y más productivos.)
C: FORMACIONES PERMEABLES EN TERRENOS VOLCANICOS	
C-1	Acuíferos muy permeables y productivos.
C-2	Acuíferos de permeabilidad y producción moderadas.
C-3	Formaciones permeables con acuíferos ligados y/o en el contacto con otras formaciones.
D: FORMACIONES DE BAJA PERMEABILIDAD O IMPERMEABLES	
D-1	Formaciones generalmente extensas, en general de baja permeabilidad que pueden albergar en profundidad acuíferos de mayor permeabilidad y productividad, incluso de interés regional.
D-2	Formaciones generalmente impermeables o de muy baja permeabilidad, que pueden albergar a acuíferos superficiales por alteración o fisuración, en general poco extensos y de baja productividad, aunque pueden tener localmente un gran interés. Los modernos pueden recubrir en algunos casos, a acuíferos cautivos productivos.

Figura 5: Categorías de zonas según color para el mapa hidrogeológico

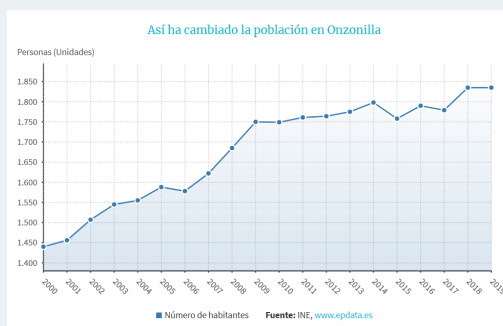
Imagen del mapa del año 2000 en formato JPG Mapa Hidrogeológico de España a escala 1:1.000.000



Figura 6: Mapa hidrogeológico de España

DATOS DEL INE Datos actualizados el 13 de enero de 2020

Población TROBAJO DEL CERECEDO



1.835 personas en 2019, lo que supone una variación del 0% respecto al mismo periodo del año anterior

Paro registrado

125 personas en paro en noviembre de 2019 (un 7,76% respecto al mismo mes del año anterior)

Deuda pública del ayuntamiento

0 euros (2018), lo que supone una variación del DATO NO ENCONTRADO% con respecto al año anterior.

Deuda pública per cápita

0 euros per cápita

Así ha cambiado la población en Onzonilla

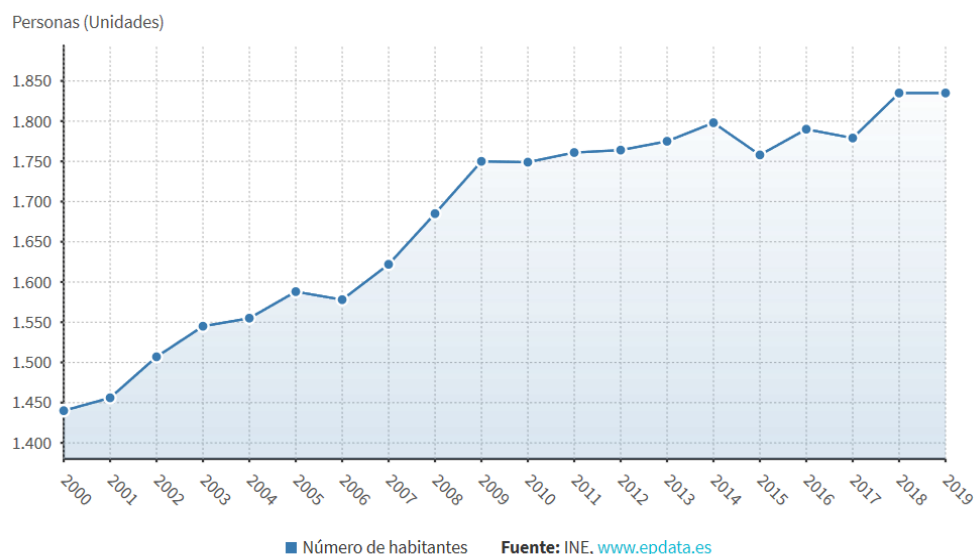
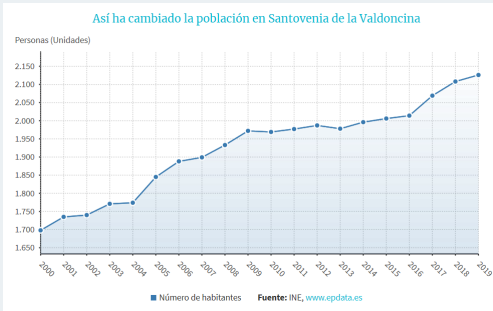


Figura 7: Gráfico crecimiento población Trabajo del Cerecedo

DATOS DEL INE Datos actualizados el 13 de enero de 2020

<p>Población ONZONILLA</p>	<p>Así ha cambiado la población en Santovenia de la Valduncina</p>  <p>2.126 personas en 2019, lo que supone una variación del 0,85% respecto al mismo periodo del año anterior</p>
<p>Paro registrado</p>	<p>147 personas en paro en noviembre de 2019 (un - 3,92% respecto al mismo mes del año anterior)</p>
<p>Deuda pública del ayuntamiento</p>	<p>0 euros (2018), lo que supone una variación del DATO NO ENCONTRADO% con respecto al año anterior.</p>
<p>Deuda pública per cápita</p>	<p>0 euros per cápita</p>

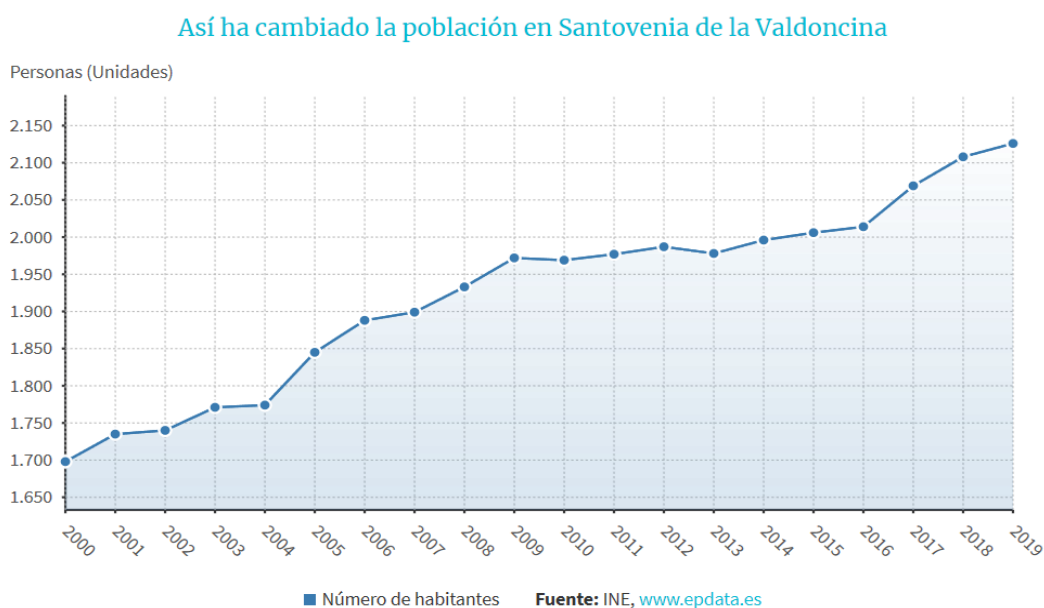


Figura 8: Grafico crecimiento población Onzonilla

DATOS DEL INE Datos actualizados el 13 de enero de 2020

<p>Población SANTOVENIA DE LA VALDONCINA</p>	<p>Así ha cambiado la población en Valverde de la Virgen</p>  <p>7.328 personas (2019), lo que supone una variación del 0,47% con respecto al mismo periodo del año anterior</p>
<p>Paro registrado</p>	<p>147 personas en paro en noviembre de 2019 (un -3,92% respecto al mismo mes del año anterior)</p>
<p>Deuda pública del ayuntamiento</p>	<p>0 euros (2018), lo que supone una variación del DATO NO ENCONTRADO% con respecto al año anterior.</p>
<p>Deuda pública per cápita</p>	<p>0 euros per cápita</p>

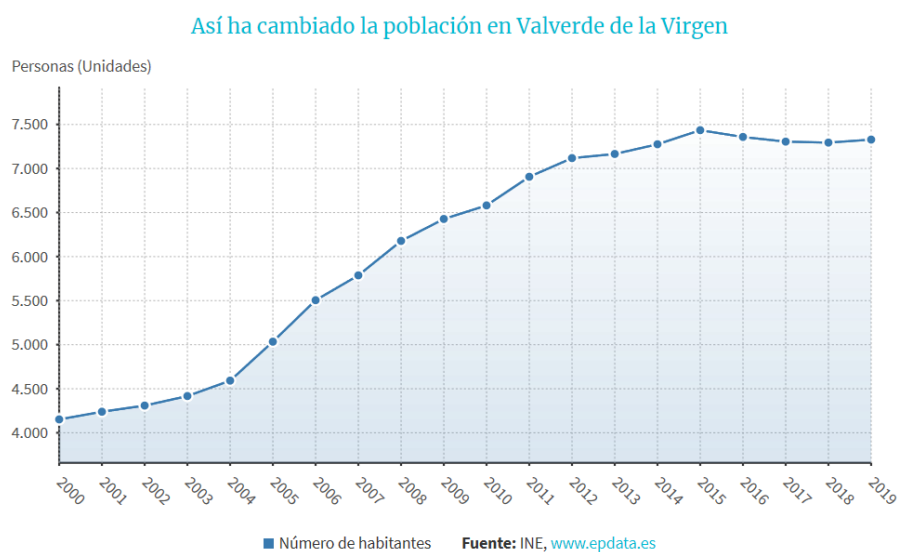


Figura 9: Grafico crecimiento población Santovenia de la Valdoncina

2.4 POSIBLES FALLOS ESTRUCTURALES

A la hora de diseñar un depósito son varios los posibles fallos estructurales a tener en consideración, es decir, la estructura puede fallar por factores como son la variación de presiones debidas al agua durante el llenado o vaciado, corrosión interior, oxidación exterior, grietas causadas por pequeños seísmos o una mala revisión, pandeo, fallo en las uniones mecánicas o en las soldaduras, colapso de la estructura por la presión superficial ejercida por el viento, etc.

A continuación, se mostrarán ejemplos de algunos fallos estructurales que dan lugar al colapso estructural.



CORROSIÓN DE LAS JUNTAS DEL DEPÓSITO

Figura 10: Fallo depósito elevado con corrosión de las juntas



COLAPSO PRESIÓN DEL VIENTO

Figura 12: Colapso depósito por presión del viento



PRESIÓN DEL VIENTO

Figura 11: Fallo depósito elevado por presión del viento



GRIETAS POR PERTURBACIÓN SÍSMICA

Figura 13: Fallo de depósito por sismo



FALLO DE LA CIMENTACIÓN

Figura 14: Fallo de la zapa del depósito

3 MEMORIA DESCRIPTIVA

3.1 TEORÍA DE LÁMINAS

La estructura laminar se fundamenta en un sólido bidimensional o superficial deformable en el que una de sus dimensiones es mucho menos que las dos restantes.

Por otra parte, al ser una lámina se asume una cierta curvatura al contrario de si fuese una placa ya que la curvatura sería nula. Por otro lado, las láminas se diferencian de las membranas en que estas tienen mayor espesor que las membranas y, por consiguiente, aguantan mejor los esfuerzos de compresión. Las membranas solo tienen esfuerzos en el plano tangente. Las láminas son elementos de superficie que tienen una radio de curvatura como mínimo diez veces mayor al espesor. Por ende, las láminas delgadas tendrán unos valores de $\frac{\text{espesor}}{\text{radio de curvatura}} \cong \frac{1}{20}$ aunque también es posible encontrar láminas con $\frac{\text{espesor}}{\text{radio de curvatura}} \cong \frac{1}{1000}$ sin considerarse membranas.

En una lámina hay dos curvaturas: la que soporta la mínima cantidad de esfuerzos, curvatura mínima, y la que soporta la máxima, curvatura máxima. Para poder soportar el esfuerzo de compresión, las caras de las láminas no pueden ser paralelas.

A su vez, las láminas experimentan solicitaciones que derivan de la curvatura y se distribuyen en la superficie de esta; dichos esfuerzos son tangenciales, torsores, momentos flectores, cortantes y esfuerzos axiales. Para hacer el estudio de los esfuerzos, las láminas se pueden asemejar a membranas, siempre que se analicen en las acciones el entorno separado. Para ello se usa la teoría membranar (problema isostático) junto con la teoría de flexión (problema hiperestático).

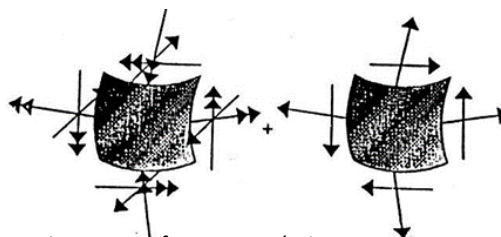


Figura 15: Esfuerzos en Láminas

3.1.1 Teoría Membranal

Para explicar esta teoría, se elige un trozo de la membrana con dos meridianos y paralelos contiguos de distancias infinitesimales.

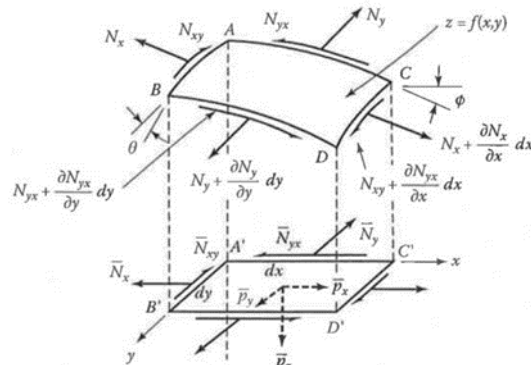


Figura 16: Descomposición de esfuerzos membranales

La superficie de la membrana ABCD definida por $z=f(x,y)$ posee curvaturas de inclinación que se miden gracias a θ y ϕ . Estos servirán para simplificar el problema proyectando el elemento diferencial en un plano OXY. Al introducir la carga P con sus respectivas componentes p_x, p_y, p_z la lámina estará sometida a un estado membranal de tensión bajo las fuerzas $N_x, N_y, N_{xy} = N_{yx}$

Proyectando dichas fuerzas en el plano, resultara:

$$N_x = \bar{N}_x \frac{\cos\theta}{\cos\phi} \quad N_y = \bar{N}_y \frac{\cos\theta}{\cos\phi} \quad \bar{N}_{xy} = \bar{N}_{xy}$$

Siendo:

$$\tan\phi = \frac{\partial z}{\partial y} \quad \tan\theta = \frac{\partial z}{\partial x}$$

Como se trata de un problema isostático, se realiza el equilibrio de fuerzas en la dirección x, y, z se obtendrán las ecuaciones de equilibrio de una membrana.

$$\begin{aligned} \sum F_x: \frac{\partial \bar{N}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{N}_{xy}}{\partial x} + \bar{p}_x &= 0 \\ \sum F_y: \frac{\partial \bar{N}_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{N}_y}{\partial x} + \bar{p}_y &= 0 \\ \sum F_z: \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{N}_x \frac{\partial z}{\partial x} + \bar{N}_{xy} \frac{\partial z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\bar{N}_y \frac{\partial z}{\partial y} + \bar{N}_{xy} \frac{\partial z}{\partial x} \right) + \bar{p}_z &= 0 \end{aligned}$$

Para el equilibrio en la dirección z, se proyectan las direcciones de los esfuerzos y simplificando resultará:

$$\bar{N}_x \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + 2\bar{N}_{xy} \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} + \bar{N}_y \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = -\bar{p}_z + \bar{p}_x \frac{\partial z}{\partial x} + \bar{p}_y \frac{\partial z}{\partial y}$$

3.1.2 Teoría de Flexión

Las láminas no solo trabajan con los esfuerzos membranales, además desarrollan flexión en puntos como cambios de geometría, empotramientos o cargas puntuales. Dichos fenómenos se analizan gracias a la teoría de flexión (hiperestática), donde se evaluará la compatibilidad y el equilibrio del sistema.

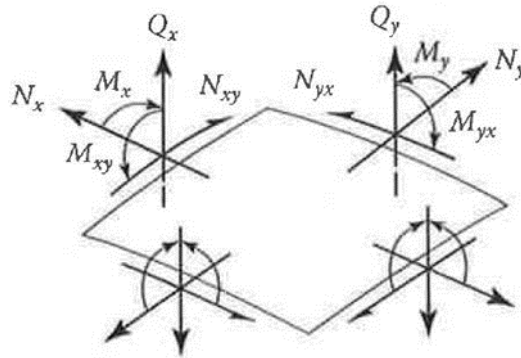


Figura 17: Esfuerzos membranales en una lámina

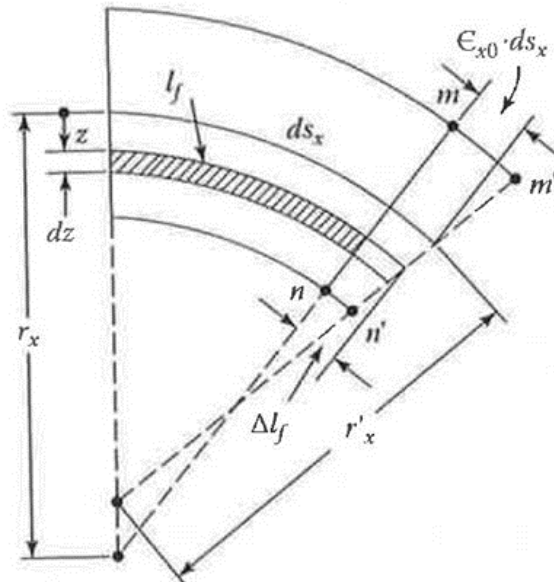


Figura 18: Sección de una lámina según el plano xz

Para hallarlas, se toma un trozo de lámina de espesor t , cuya línea media se sitúa a una distancia r_x o r_y de uno de los centros de curvatura de ésta. Si se toma un espesor de lámina z , servirá para explicar el procedimiento para hallar los esfuerzos membranales buscados.

La longitud de un elemento en el plano xz localizado a distancia z de la superficie media se calcula:

$$\frac{ds_x(r_x - z)}{r_x} = \left(1 - \frac{z}{r_x}\right)ds_x$$

Las tensiones que actúan en las caras planas del elemento son σ_x , σ_y , τ_{xy} , τ_{xz} , y τ_{yz} . Por tanto, se calcula N_y como la fuerza resultante normal a la cara del plano xz por unidad de longitud como:

$$N_y ds_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y \left(1 - \frac{z}{r_x}\right) ds_x dz \quad N_y = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y \left(1 - \frac{z}{r_x}\right) dz = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y (1 - zk_x) dz$$

Análogamente para hallar el resto de los esfuerzos:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ N_{yx} \\ Q_x \\ Q_y \end{Bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x(1 - zk_y) \\ \sigma_y(1 - zk_x) \\ \tau_{xy}(1 - zk_y) \\ \tau_{yx}(1 - zk_x) \\ \tau_{xz}(1 - zk_y) \\ \tau_{yz}(1 - zk_x) \end{Bmatrix} dz$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \\ M_{yx} \end{Bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x(1 - zk_y) \\ \sigma_y(1 - zk_x) \\ \tau_{xy}(1 - zk_y) \\ \tau_{yx}(1 - zk_x) \end{Bmatrix} z dz$$

A pesar de que $r_x \neq r_y$ tienen curvaturas distintas y por tanto N_{xy} no tendría por que ser igual que N_{yx} , el cociente $\frac{z}{r_y}$ y $\frac{z}{r_x}$ es aproximadamente 0 ya que $t \ll r_x$ y $t \ll r_y$, resultado que $N_{xy} = N_{yx}$.

$$N_{xy} = \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{xy}(1 - zk_y) dz = \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{xy}(1 - zk_z) dz = N_{yx}$$

Esto mismo ocurre con M_{xy} y M_{yx} , por tanto $M_{xy} = M_{yx}$.

El resto de esfuerzos membranales se resuelven con ayuda de la Ley de Hooke.

$$\sigma_x = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x)$$

$$\tau_{xy} = \gamma_{xy} G$$

La deformación longitudinal ε_x se halla por geometría considerando que $t \ll r$ según la última figura como:

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta l_f}{l_f} = \frac{ds_x(1 - \frac{z}{r_x})}{ds_x(1 + \varepsilon_{xo}) \left(1 - \frac{z}{r'_x}\right) - l_f} = \varepsilon_{xo} - z \left(\frac{1}{r'_x} - \frac{1}{r_x} \right) = \varepsilon_{xo} - z X_x$$

Siendo r_x el radio de curvatura después de la deformación y X_x el cambio de curvatura de la superficie media. De la misma manera se halla ε_y :

$$\varepsilon_y = \varepsilon_{y0} - zX_y$$

La deformación angular γ_{xy} se halla de manera análoga:

$$\gamma_{xy} = \gamma_{xy0} - 2z\gamma_{xy}$$

siendo γ_{xy} el giro de la superficie media.

Sustituyendo en la Ley de Hooke resultan las siguientes tensiones:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_{x0} + \nu\varepsilon_{y0} - z(X_x + \nu X_y))$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_{y0} + \nu\varepsilon_{x0} - z(X_y + \nu X_x))$$

$$\tau_{xy} = (\gamma_{xy0} - 2z\gamma_{xy})G$$

Y resolviendo las integrales resulta:

$$N_x = \frac{Et}{1-\nu^2} (\varepsilon_{x0} + \nu\varepsilon_{y0})$$

$$N_y = \frac{Et}{1-\nu^2} (\varepsilon_{y0} + \nu\varepsilon_{x0})$$

$$N_{xy} = N_{yx} = \frac{\gamma_{xy0}Et}{2(1+\nu)}$$

$$M_{xy} = M_{yx} = -D(1-\nu)X_{xy}$$

$$M_x = -D(X_x + \nu X_y)$$

$$M_y = -D(X_y + \nu X_x)$$

Donde $D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$ define la rigidez a flexión de la membrana.

3.2 DATOS PARA LA SIMULACIÓN

Como se va a diseñar un depósito en altura, el volumen del líquido va ser mucho menor que el que hay en un depósito de otra terminología (enterrado, semienterrado o superficial), debido a las limitaciones estructurales que conlleva elevar una masa de agua a cierta altura.

Esto dicho, se considera que la forma del recipiente de agua sea cilíndrica. Por lo que se plantea esta sencilla fórmula para calcular el volumen.

$$V = \frac{\pi}{4} * \varnothing^2 * h$$

Entonces, conociendo el volumen aproximado de agua que contendrá el depósito, se tendrá que buscar una relación óptima entre el diámetro \varnothing y la altura h para el diseño de un tanque capaz de aguantar la presión hidrostática ejercida por el agua, así como otros tipos de solicitaciones a los que esté sometida la estructura.

Considerándose que el depósito deberá abastecer alrededor de 1000 personas y como de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) **una persona** debe consumir en promedio **100 litros de agua para satisfacer las necesidades tanto de consumo como de higiene**, el depósito deberá tener un volumen de $100.000 \text{ litros} = 100 \text{ m}^3$ aproximadamente

- Diámetro interno deposito: 5m
- Altura del depósito: 5m
- Densidad del agua: 1000 kg/m^3
- Gravedad: 9.8 m/s^2
- Presión base del depósito: $\rho * g * h$
- Presión paredes del depósito: $\rho * g * h$, siendo h variable, estando el punto más crítico en el fondo de la pared (suposición previa a la simulación)

3.3 UNIDADES DE MEDIDA EN EL ANALISIS DE MEF

En el análisis de elementos finitos es muy importante el sistema de unidades en el que se va a trabajar ya que, si no, la solución no tendrá sentido físico.

A continuación, se mostrarán las variables que van a afectar al cálculo estructural seguidas de su correspondiente unidad.

- Presión: Mpa
- Longitudes, radios, alturas, espesor: mm
- Módulo de elasticidad E : Mpa
- Coef. de Poisson ν : adimensional

3.4 MATERIALES A ELECCIÓN

A la hora de la selección de los materiales para la construcción del depósito se consideraron tres opciones y se eligió la más ventajosa en términos de resistencia estructural, eficiencia y precio.

La primera opción fue la de hacer la estructura de acero y el recipiente de fibra de vidrio lo que reduciría considerablemente el peso, pero aumentaría el coste y, puesto que este material es muy frágil, reduciría la resistencia a cualquier tipo de impacto. Por otra parte, la rigidez del material daría problemas a la hora de estar sometido a una

presión externa como el viento. También este tipo de material se caracteriza por su mala resistencia a compresión por lo que decidí desechar esta primera opción.

La segunda opción sería hacer todo el depósito en hormigón, opción más lógica, pero con una serie de inconvenientes. Primero, el hormigón a pesar de ser más barato se debe de fabricar en obra por lo que el depósito se encarecería en demasía por la contratación de mano de obra durante un periodo de tiempo largo. Al ser el depósito una masa de agua suspendida en el aire, la acción sísmica va a cobrar un papel importante, por lo que el hormigón sería una mala opción debido a su rigidez, a diferencia del acero gracias a su flexibilidad. Así pues, en el hormigón si falla la estabilidad daría lugar al colapso de la estructura, en cambio en el acero daría lugar a una deformación por lo que habría un margen de maniobra para evitar daños mayores. Por otra parte, el comportamiento del hormigón es deficiente a tracción; sin embargo, el acero tiene una capacidad bruta en todos los estados de tensión equivalente. El límite resistente del hormigón armado esta entre 200-400Mpa y el del acero entre 200-600Mpa por lo que las propiedades del acero son superiores. Por último, el ajuste de la estructura en condición de falla es impredecible no como pasa en el acero, en el que la estructura es propensa a redistribuir las cargas en condición de falla.

Estudiando las ventajas y desventajas la mejor opción sería la tercera, la cual es hacer la estructura del depósito de acero y el recipiente de acero inoxidable para evitar los fenómenos de corrosión interna y oxidación externa.

Acero inoxidable depósito

En concreto, para el depósito se ha elegido el acero inoxidable de grado 304 en el cual en la imagen de la izquierda se muestran sus valores máximo y mínimos en el S.I. por lo que para el cálculo se cogerán los valores medios más importantes.

Densidad=7960kg/m³

Limite Elástico=310Mpa

v=0.27

Material:	Stainless Steel - Grade 304 (UNS S30400)
Composition:	Fe/<.08C/17.5-20Cr/8-11Ni/<2Mn/<1Si/<.045P/<.03S

Property	Minimum Value (S.I.)	Maximum Value (S.I.)	Units (S.I.)	Minimum Value (Imp.)	Maximum Value (Imp.)	Units (Imp.)
Atomic Volume (average)	0.0069	0.0072	m ³ /kmol	421.064	439.371	in ³ /kmol
Density	7.85	8.06	Mg/m ³	490.06	503.17	lb/ft ³
Energy Content	89	108	MJ/kg	9642.14	11700.6	kcal/lb
Bulk Modulus	134	151	GPa	19.435	21.9007	10 ⁶ psi
Compressive Strength	205	310	MPa	29.7327	44.9617	ksi
Ductility	0.3	0.57		0.3	0.57	NULL
Elastic Limit	205	310	MPa	29.7327	44.9617	ksi
Endurance Limit	175	260	MPa	25.3816	37.7098	ksi
Fracture Toughness	119	228	MPa.m ^{1/2}	108.296	207.491	ksi.in ^{1/2}
Hardness	1700	2100	MPa	246.564	304.579	ksi
Loss Coefficient	0.00095	0.0013		0.00095	0.0013	NULL
Modulus of Rupture	205	310	MPa	29.7327	44.9617	ksi
Poisson's Ratio	0.265	0.275		0.265	0.275	NULL

Tabla 1: Propiedades acero inoxidable

soldadura de 304 con grado 308 y 304L con varillas o electrodos de 308L (y con sus altos equivalentes de silicio).

E=210Gpa

Corrosión:

El acero inoxidable grado 304 es excelente en una amplia gama de entornos atmosféricos y muchos medios corrosivos. Está sujeto a corrosión por picaduras y grietas en ambientes cálidos de cloruro y a grietas por corrosión bajo tensión por encima de 60 ° C (aproximada). Se considera que el grado 304 es resistente al agua potable hasta aproximadamente 200 mg / L de cloruros a temperatura ambiente, reduciéndose aproximadamente a 150 mg / L a 60 ° C.

Soldadura:

El grado 304 tiene una excelente soldabilidad mediante todos los métodos de fusión estándar, con y sin metales de aporte. AS 1554.6 precalifica la

Perfiles IPN base

Por otra parte, las vigas que forman la base del depósito serán del perfil IPN-120 de acero normal 355JR. El límite elástico va a depender del espesor, como se muestra en la siguiente tabla, por lo que los espesores serán menores a 16mm y el límite elástico será 355Mpa

Tabla 4.1 Características mecánicas mínimas de los aceros UNE EN 10025

DESIGNACIÓN	Espesor nominal t (mm)				Temperatura del ensayo Charpy °C
	Tensión de límite elástico f_y (N/mm ²)			Tensión de rotura f_u (N/mm ²)	
	$t \leq 16$	$16 < t \leq 40$	$40 < t \leq 63$	$3 \leq t \leq 100$	
S235JR					20
S235J0	235	225	215	360	0
S235J2					-20
S275JR					20
S275J0	275	265	255	410	0
S275J2					-20
S355JR					20
S355J0	355	345	335	470	0
S355J2					-20
S355K2					-20 ⁽¹⁾
S450J0	450	430	410	550	0

⁽¹⁾ Se le exige una energía mínima de 40J.

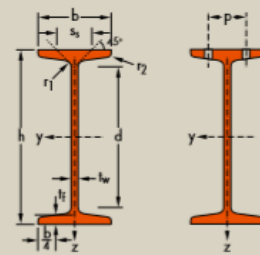
Tabla 2: Propiedades acero perfil IPN según el espesor nominal

3 Las siguientes son características comunes a todos los aceros:

- módulo de Elasticidad: E 210.000 N/mm²
- módulo de Rigidez: G 81.000 N/mm²
- coeficiente de Poisson: ν 0,3
- coeficiente de dilatación térmica: α $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ } (^{\circ}\text{C})^{-1}$
- densidad: ρ 7.850 kg/m³

Tabla 3: Propiedades acero perfil IPN

Propiedades mecánicas de aceros estructurales según norma europea EN

Pág. 24 de 92

Perfiles tubulares

Por otra parte, los perfiles tubulares que conformarán las columnas que sustente al depósito serán de acero S275 y el perfil 200-9, también de acero.

CLASES DE SECCIÓN secciones CIRCULARES de acero S 275 A COMPRESIÓN SIMPLE y FLEXIÓN M_y o M_z

Perfil	Dimensiones		
	d mm	t mm	CLASE
50-4	50	4	1
60-2	60	2	1
60-3	60	3	1
60-4	60	4	1
75-2	75	2	1
75-3	75	3	1
75-4	75	4	1
75-5	75	5	1
90-2	90	2	2
90-3	90	3	1
90-4	90	4	1
90-5	90	5	1
90-6	90	6	1
94-2	94	2	2
94-3	94	3	1
94-4	94	4	1
94-5	94	5	1
94-6	94	6	1
100-2	100	2	2
100-3	100	3	1
100-4	100	4	1
100-5	100	5	1
100-6	100	6	1
115-2	115	2	2
115-3	115	3	1
115-4	115	4	1
115-5	115	5	1
115-6	115	6	1
115-7	115	7	1
125-3	125	3	1
125-4	125	4	1
125-5	125	5	1
125-6	125	6	1
125-7	125	7	1

Perfil	Dimensiones		
	d mm	t mm	CLASE
135-4	135	4	1
135-5	135	5	1
135-6	135	6	1
135-7	135	7	1
135-8	135	8	1
150-4	150	4	1
150-5	150	5	1
150-6	150	6	1
150-7	150	7	1
150-8	150	8	1
150-9	150	9	1
155-4	155	4	1
155-5	155	5	1
155-6	155	6	1
155-7	155	7	1
155-8	155	8	1
155-9	155	9	1
165-4	165	4	1
165-5	165	5	1
165-6	165	6	1
165-7	165	7	1
165-8	165	8	1
165-9	165	9	1
175-4	175	4	2
175-5	175	5	1
175-6	175	6	1
175-7	175	7	1
175-8	175	8	1
175-9	175	9	1
200-5	200	5	1
200-6	200	6	1
200-7	200	7	1
200-8	200	8	1
200-9	200	9	1

Perfil	Dimensiones		
	d mm	t mm	CLASE
219-5	219	5	2
219-6	219	6	1
219-7	219	7	1
219-8	219	8	1
219-9	219	9	1
244,5- 6	244,5	6	1
244,5- 8	244,5	8	1
244,5-10	244,5	10	1
244,5-12	244,5	12	1
244,5-14	244,5	14	1
273- 6	273	6	2
273- 8	273	8	1
273-10	273	10	1
273-12	273	12	1
273-14	273	14	1
323,9- 8	323,9	8	1
323,9-10	323,9	10	1
323,9-12	323,9	12	1
323,9-14	323,9	14	1
355,6- 8	355,6	8	2
355,6-10	355,6	10	1
355,6-12	355,6	12	1
355,6-14	355,6	14	1
406,4- 8	406,4	8	2
406,4-10	406,4	10	1
406,4-12	406,4	12	1
406,4-14	406,4	14	1

Tabla 6: Medidas y datos de perfiles tubulares S275

Propiedades mecánicas de aceros estructurales según norma europea EN

4 ANEXO CÁLCULOS

4.1 SIMULACIÓN MEF DEL RECIPIENTE DE AGUA (ELEMENTOS 1D BEMA Y 2D SHELL)

Considerando los datos de partida de diámetro, altura y el tipo de perfiles y materiales a utilizar se empieza la simulación en Nastran y Patran.

4.1.1 Creación de la geometría

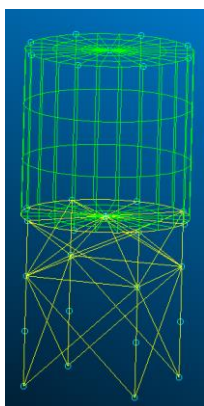


Figura 19: Modelado del depósito 3D con elementos "beam" y "surface"

El primer paso es crear los elementos "surface" y "curves" en los que está contenido el mallado. Cabe destacar que el tamaño de estos elementos debe ser similar para evitar que en el mallado se pierdan detalles estructurales.

La primera geometría creada ha sido el depósito donde estará contenida el agua como se muestra en la figura de la derecha. Se ha creado con superficies normales las cuales formarán elementos "Shell".

Además, queda la construcción geométrica de la estructura que sustentará el depósito, la cual se definirá con líneas las cuales pasarán a ser elementos "beam", cada uno con sus características y perfiles concretos.

Figura 20: Modelado mallado de elementos "shell" y "beam"

4.1.2 Creación del mallado "MEF"

Una vez se han creado los elementos "line" y "surface" los mallo con una separación de malla de 250 para la primera simulación. Cabe destacar que conforme disminuya el tamaño de la malla, la simulación será más precisa pero más costosa computacionalmente hablando, por lo que se tendrá que llegar a una solución de compromiso. Por consecuente, se ha llegado a la conclusión que la relación optima entre precisión de resultado y esfuerzo del ordenador es para una malla de 250 de separación.

También cabe destacar que a la hora de mallar se tiene que diferenciar entre elementos "line" y elementos "surface" ya que no tienen la misma dimensión.

Finalmente, el mallado se ve en la imagen de la derecha.

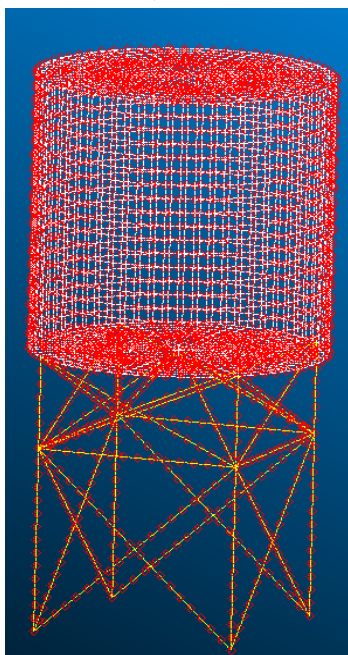


Figura 22: Nodos del mallado

No obstante, los elementos "line" no se llega a apreciar visualmente así que se representa todos los nodos para que se vea, como se aprecia en la siguiente imagen.

Por último, hay que juntar los nodos que se han creado en los bordes de cada elemento para que el programa no vea nodos repetidos; así pues, se tiene que aplicar "equivalence"

4.1.3 Crear propiedades y materiales de elementos

Una vez creada la malla en cada elemento se debe definir las propiedades del material que conforma dicha geometría. Puesto que las dimensiones entre elementos

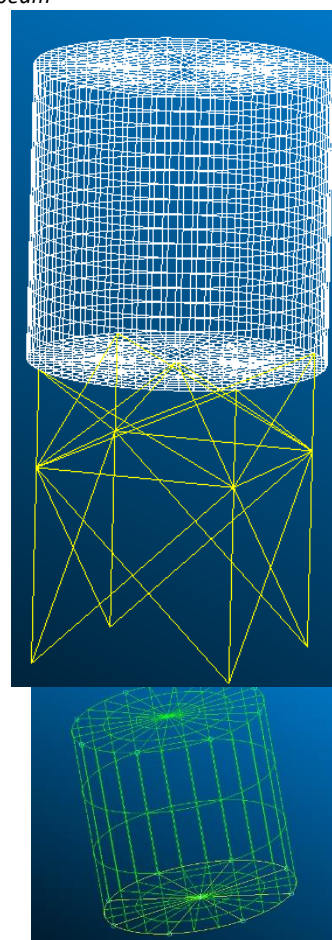


Figura 21: Modelado recipiente con elementos "shell"

van a ser distintas como ya se ha mencionado, se definirán de manera distinta los elementos cáscara de los elementos viga.

4.1.3.1 Elementos “shell”

En esta simulación se considera que el espesor de la chapa de la base es de 11 mm, el de la pared de 3mm y el del techo de 2mm. Puesto que el material del que están formadas es acero inoxidable de grado 304 se tiene que meter el coeficiente de Poisson y el módulo elásticos correspondientes.

En este caso, las chapas inoxidables tendrán un límite elástico de 310Mpa

4.1.3.2 Elementos “beam”

Va a haber tres tipos distintos de perfiles:

- Perfiles IPN-140 de acero y límite elástico 355Mpa
- Perfiles tubulares 200-9 de límite elástico 275Mpa
- Tirantes de 10mm de diámetro de límite elástico de 375Mpa

Basándose en las tablas de la norma europea UNE, se define la geometría de cada perfil y se atribuye a cada elemento correspondiente.

4.1.4 Definir cargas y restricciones

La primera restricción de desplazamiento, y la única, es donde apoya la estructura como se muestra en la imagen de la derecha.

Una vez hecho esto se debe definir las cargas y presiones a las que va a estar sometida la estructura como la presión hidrostática en la base y las paredes, la presión debida a las cargas del viento y la presión que ejercería la nieve o el agua en caso de estar solicitado a un seísmo. No obstante, necesita las ecuaciones que definan estas presiones por lo que se tendrán que calcular basadas en códigos técnicos y estudios científicos.

Dichas ecuaciones se definirán en la pestaña “fields” de Patran y Nastran.

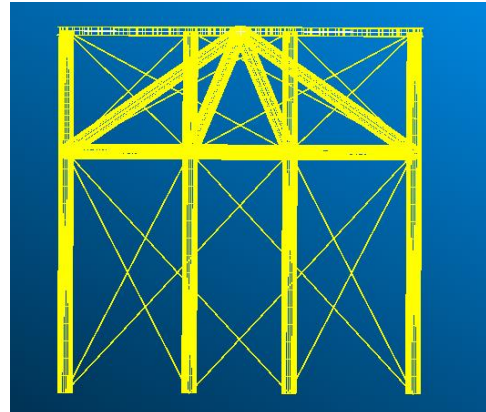


Figura 23: Elementos “beam” representados

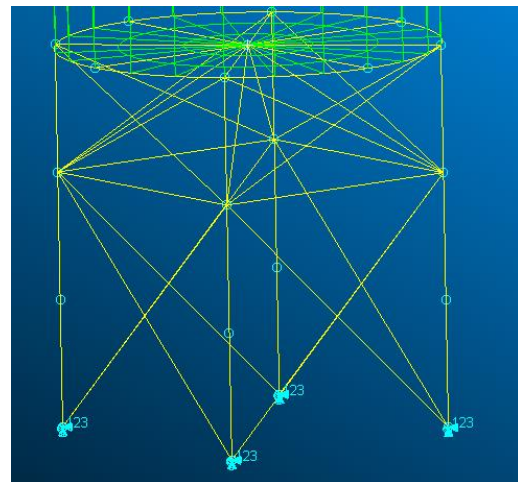


Figura 24: Nodos con restricción de movimiento

4.2 OBTENCIÓN DE ECUACIONES DE SOLICITACIONES

4.2.1 Presión hidrostática paredes y base

Una vez hecho esto, se debe definir las presiones que actúan sobre las caras de depósito utilizando la ecuación de la presión hidrostática $\rho * g * h$.

La presión en la base será:

$$P_{base} = \rho * g * h = \frac{1000 * 9.8 * 5}{10^6} = 0.049 \text{ Mpa}$$

Por otra parte, la presión en la cara lateral de h que varía conforme el nivel de agua.

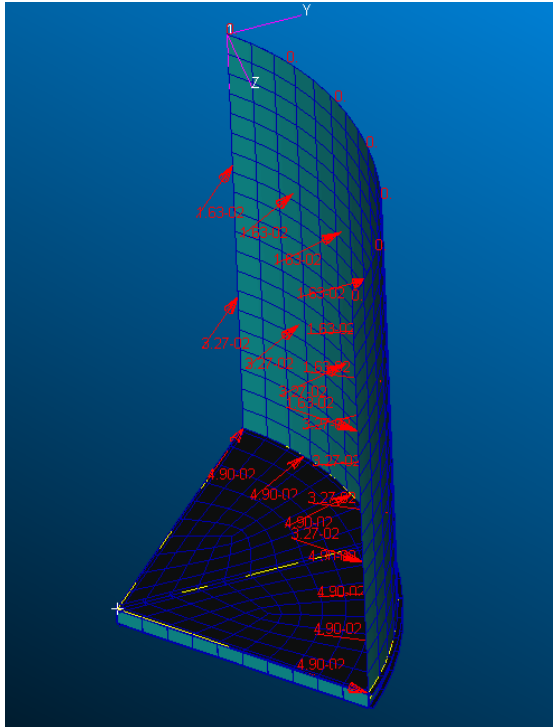


Figura 25: Vectores presión hidrostática sobre pared

$$P_{laterales} = \rho * g * h = \frac{1000 * 9.8 * h}{10^3 * 10^6}$$

Una vez planteadas las solicitaciones que actuarán sobre la estructura, habrá que insertarlas en esta.

Cabe de destacar que el depósito se simulará en condiciones críticas, lleno hasta el borde.

Asimismo, para simular la presión hidrostática sobre la superficie lateral, se tuvo que crear un sistema de referencia auxiliar de coordenadas cartesianas con el fin de tomar un origen de coordenadas sobre la superficie del líquido para simular la presión hidrostática sobre las paredes del tanque como se muestra en la siguiente imagen de la izquierda. En el caso de la presión sobre la base no ha sido necesario ya que es constante.

4.2.2 Histórico de vientos en la zona

Se muestra el histórico de vientos en la capital de la provincia desde el año 2014 al 2017, por lo que estos datos van a servir para obtener la velocidad máxima que se ha dado en la zona para así poder considerar un estado crítico de cálculo que no se va a superar.

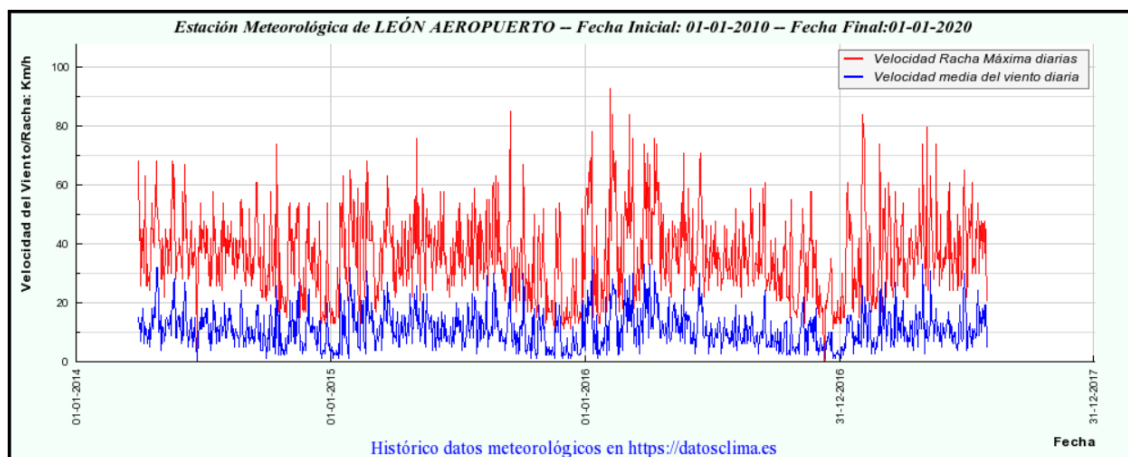


Figura 26: Gráfico velocidades máximas y mínimas del viento

Resumen de Valores de Viento a lo largo del Periodo seleccionado:

CARACTERISTICA / VALOR	(Velocidad m/s)	(Velocidad Km/h)	FECHA	HORA
Racha de Viento más alta Registrada:	25.8	92.88	06-02-2016	18:44
Velocidad Media más alta Registrada:	10.0	36	11-01-2016	

Figura 7: Velocidad máxima y mínima viento en León

Siendo la velocidad máxima de 92.88Km/h, que es la que se tiene en cuenta en el cálculo.

4.2.3 Cálculo de la ecuación de la presión del viento sobre cilindro

A la hora de calcular la carga que genera la acción del viento, se va a utilizar la norma establecida en el Eurocódigo 1: acciones en estructuras, acciones del viento.

El primer paso es calcular la velocidad media del viento. Como se aprecia en la ecuación, la velocidad del viento varía en función de la altura.

4.3 Velocidad media del viento

4.3.1 Variación con la altura

(1) La velocidad media del viento $v_m(z)$ a una altura z por encima del terreno, depende de la rugosidad y la orografía del terreno, y de la velocidad básica del viento, v_b , y se debería determinar mediante la expresión (4.3)

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \quad (4.3)$$

donde

$c_r(z)$ es el factor de rugosidad, indicado en el apartado 4.3.2.

$c_o(z)$ es el coeficiente topográfico, que se toma como 1,0 a no ser que se especifique lo contrario en el apartado 4.3.3.

NOTA 1 – La información sobre el factor c_o se puede proporcionar en el anexo nacional. Si se tiene en cuenta la orografía en la velocidad básica del viento, el valor recomendado es 1,0.

NOTA – El procedimiento para determinar $c_r(z)$ se puede proporcionar en el anexo nacional. El procedimiento recomendado para la determinación del factor de rugosidad a una altura z viene dado por la expresión (4.4), y se basa en un perfil logarítmico de velocidades.

$$\begin{aligned} c_r(z) &= k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) & \text{para } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \\ c_r(z) &= c_r(z_{\min}) & \text{para } z \leq z_{\min} \end{aligned} \quad (4.4)$$

donde

z_0 es la longitud de la rugosidad;

k_r factor del terreno, que depende de la longitud de la rugosidad z_0 y calculado utilizando:

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad (4.5)$$

donde

$z_{0,II} = 0,05$ m (categoría de terreno II, tabla 4.1);

z_{\min} es la altura mínima, definida en la tabla 4.1;

z_{\max} se toma igual a 200 m.

z_0 , z_{\min} dependen de la categoría del terreno. Los valores recomendados se muestran en la tabla 4.1 dependiendo de cinco categorías de terreno representativas.

La expresión (4.4) es válida cuando la distancia de terreno con rugosidad uniforme a barlovento es suficiente como para estabilizar el perfil de velocidades, véase el punto (2).

Categoría de terreno		z_0 m	z_{\min} m
0	Mar abierto o zona costera expuesta al mar abierto	0,003	1
I	Lagos o áreas planas y horizontales con vegetación despreciable y sin obstáculos	0,01	1
II	Áreas con vegetación baja, como hierba, y obstáculos aislados (árboles, edificaciones) con separaciones de al menos 20 veces la altura de los obstáculos	0,05	2
III	Áreas con una cobertura de vegetación uniforme o edificaciones o con obstáculos aislados con una separación máxima de 20 veces la altura de los obstáculos (villas, terreno suburbano, bosques permanentes)	0,3	5
IV	Áreas en las que al menos un 15% de la superficie está cubierta por edificios cuya altura media supera los 15 m	1,0	10
NOTA – Las categorías de terrenos se ilustran en el capítulo A.1.			

Tabla 7: Categoría de terremotos y parámetros del terreno

La zona de construcción del depósito es plana y con vegetación, por lo que se considera una categoría de terreno de clase II, con lo que la rugosidad del terreno z_0 será:

$$z_0 = 0.05$$

Por otra parte, el factor del terreno dará:

$$k_r = 0.19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0.07} = 0.19 \left(\frac{0.05}{0.05} \right)^{0.07} = 0.19$$

Para calcular el factor de rugosidad $c_r(z)$ se debe tener en cuenta la altura mínima $z_{min} = 2$ puesto que el depósito estará sustentado a 5m del suelo y la altura del recipiente del agua es de 10m, el rango de alturas estará comprendido en $z_{min} \leq z \leq z_{max}$, por lo que el factor de rugosidad tendrá la siguiente formula, donde "z" es la altura.

$$c_r(z) = k_r \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) = 0.19 \ln \left(\frac{z}{0.05} \right)$$

Teniendo el factor de rugosidad ya se puede calcular la velocidad media.

$$v_m(z) = c_r(z) c_0(z) v_b = 0.19 \ln \left(\frac{z}{0.05} \right) * 1 * 25.8 = 4.902 \ln \left(\frac{z}{0.05} \right)$$

Siendo el $c_0(z)$ el coeficiente topográfico que es la unidad y v_b la velocidad básica del viento que son 92.88Km/h.

NOTA 2 – Las reglas recomendadas para la determinación de $I_v(z)$ se proporcionan en la expresión (4.7)

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_1}{c_0(z) \cdot \ln(z/z_0)} \quad \text{para} \quad z_{min} \leq z \leq z_{max}$$

$$I_v(z) = I_v(z_{min}) \quad \text{para} \quad z < z_{min}$$
(4.7)

donde

k_1 es el factor de turbulencia. El valor de k_1 se puede establecer en el anexo nacional. El valor recomendado para k_1 es 1,0;

c_0 es el coeficiente topográfico, descrito en el apartado 4.3.3;

z_0 es la longitud de la rugosidad, dada en la tabla 4.1.

4.5 Presión correspondiente a la velocidad de pico

(1) Debería determinarse la presión correspondiente a la velocidad de pico, $q_p(z)$, a una altura z , que incluye la velocidad media del viento y las fluctuaciones de velocidad a corto plazo.

NOTA 1 – El anexo nacional puede proporcionar reglas para la determinación de $q_p(z)$. El procedimiento recomendado se proporciona en la expresión (4.8).

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_s(z) \cdot q_b$$
(4.8)

donde

ρ es la densidad del aire, que depende de la altitud, de la temperatura y de la presión barométrica esperada en la región durante las tormentas de viento;

Por lo que la intensidad de la turbulencia $I_v(z)$ será:

$$I_v(z) = \frac{k_1}{c_0(z) \cdot \ln(z/z_0)} = \frac{1}{1 \cdot \ln(z/0.05)}$$

Siendo k_1 el factor de turbulencia que es la unidad.

Para calcular la presión correspondiente a la velocidad de pico:

$$q_p(z) = [1 + 7I_v(z)] \frac{1}{2} * \rho * v_m^2(z) = \left[1 + 7 \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{0.05}\right)} \right] \frac{1}{2} * 1.25 * (4.902 * \ln\left(\frac{z}{0.05}\right))^2$$

Se considera la densidad del aire que recomienda la norma $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$

(2) Los coeficientes de presión externa c_{pe} para cilindros circulares se deberían determinar mediante la expresión (7.16).

$$c_{pe} = c_{p,0} \cdot \psi_{\lambda\alpha} \quad (7.16)$$

donde

$c_{p,0}$ es el coeficiente de presión externa sin flujo libre de cola (véase el punto (3));

$\psi_{\lambda\alpha}$ es el factor del efecto cola (véase el punto (4)).

(3) El coeficiente de presión externa $c_{p,0}$ viene dado en la figura 7.27 para diferentes valores del número de Reynolds como función del ángulo α

(4) El factor del efecto cola $\psi_{\lambda\alpha}$ viene dado por la expresión (7.17).

$$\begin{aligned} \psi_{\lambda\alpha} &= 1 & \text{para } 0^\circ \leq \alpha \leq \alpha_{\min} \\ \psi_{\lambda\alpha} &= \psi_\lambda + (1 - \psi_\lambda) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{\alpha - \alpha_{\min}}{\alpha_A - \alpha_{\min}}\right)\right) & \text{para } \alpha_{\min} < \alpha < \alpha_A \\ \psi_{\lambda\alpha} &= \psi_\lambda & \text{para } \alpha_A \leq \alpha \leq 180^\circ \end{aligned} \quad (7.17)$$

donde

α_A es la posición de la separación del flujo de aire (véase la figura 7.27);

ψ_λ es el factor del efecto cola (véase el apartado 7.13).

Para calcular el coeficiente de presión externa c_{pe} se necesita primero el factor de efecto de cola.

Tabla 9: Factor de cola en función de la relación de solidez

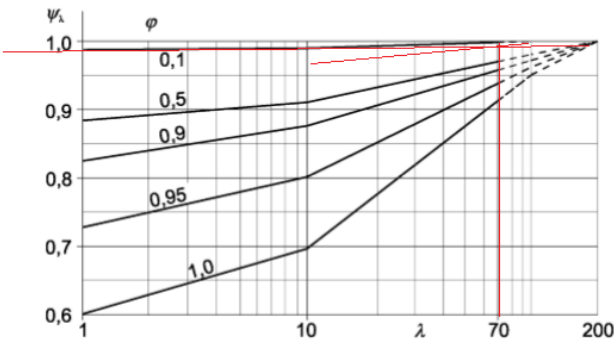


Fig. 7.36 – Valores indicativos del factor del efecto cola ψ_λ en función de la relación de solidez ϕ y la esbeltez λ .

Tabla 8: Categorías de esbeltez efectiva

(3) La relación de solidez ϕ (véase la figura 7.37) viene definida por la expresión (7.28).

$$\phi = \frac{A}{A_c}$$

donde

A es la suma de las áreas proyectadas de los elementos de la estructura

A_c es el área envolvente global $A_c = \ell \cdot b$.

$$\phi = \frac{A}{A_c} = \frac{5 \cdot 5}{2\pi \cdot 5 \cdot 5} = 0.159$$
$$\lambda = 70$$

Por lo que el factor de cola es:

$$\psi_{\lambda\alpha} = 1$$

$$\psi_{\lambda\alpha} = 1 \text{ para } 0 \leq \alpha \leq \alpha_{min}$$

Tabla 10: Valores típicos para la distribución de presiones

$$\psi_{\lambda\alpha} = 1 \text{ para } \alpha_{min} \leq \alpha \leq \alpha_A$$

$$\psi_{\lambda\alpha} = 1 \text{ para } \alpha_A \leq \alpha \leq 180$$

$$Re = \frac{b \cdot v(z_e)}{\nu} \cong 10^7$$

(1) Los coeficientes de presión de las secciones dependen del número de Reynolds, Re , que se define en la expresión (7.15).

$$Re = \frac{b \cdot v(z_e)}{\nu} \tag{7.15}$$

donde

b es el diámetro;

ν es la viscosidad cinemática del aire ($\nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$);

$v(z_e)$ es la velocidad de pico del viento definida en la Nota 2 de la figura 7.27, a una altura z_e .

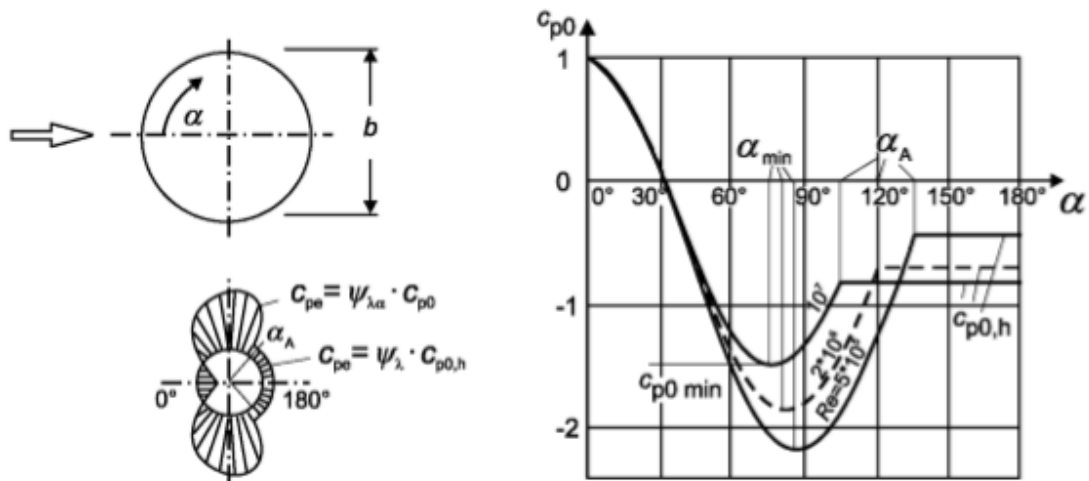


Figura 27: relación coeficiente de presión ángulo

(2) Los coeficientes de presión externa c_{pe} para cilindros circulares se deberían determinar mediante la expresión (7.16).

$$c_{pe} = c_{p,0} \cdot \psi_{\lambda\alpha} \quad (7.16)$$

5.2 Presión del viento en estructuras

(1) La presión del viento sobre las superficies exteriores, w_e , se debería obtener a partir de la expresión (5.1).

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \quad (5.1)$$

Por lo que el coeficiente de presión externa será:

$$c_{pe} = c_{p,0} * 1 = -0.5 + 0.4 * \cos(\alpha) + 0.8 * \cos(2 * \alpha) + 0.3 * \cos(3 * \alpha) - 0.1 * \cos(4 * \alpha) - 0.05 * \cos(5 * \alpha)$$

Como se observa, el coeficiente de presión varía en función del ángulo α desde el centro del cilindro.

La Figura 2 muestra como la acumulación de términos de coseno se aproxima a la forma real de la distribución de presión externa (q_w), por lo que el valor a una altura específica (q) se multiplica por el coeficiente de presión externo representado por la expresión dentro de los corchetes.

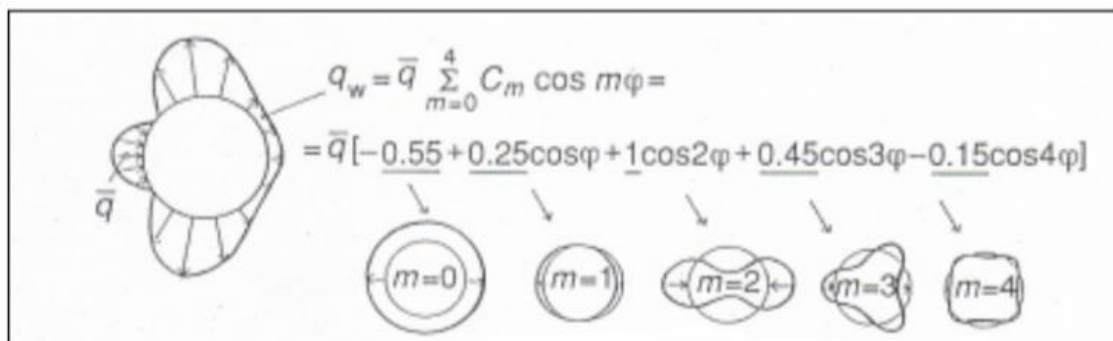


Figura 28: Aproximación numérica utilizando la serie del coseno de Fourier

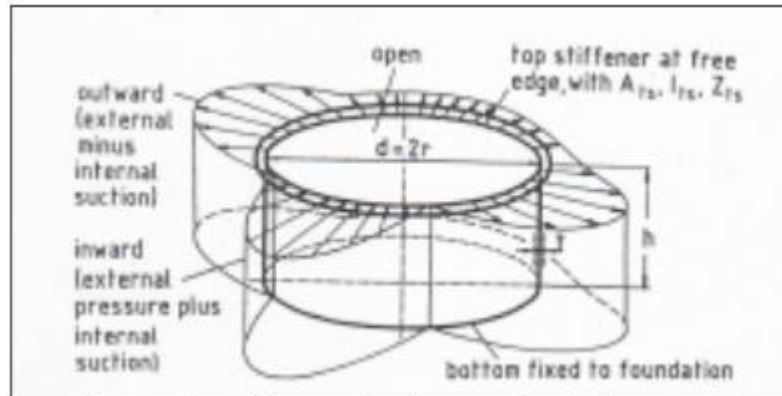


Figura 29: Distribución de presiones sobre cilindro aplicando la aproximación de Fourier

Por lo que la presión externa que experimente el depósito será la presión correspondiente a la velocidad pico o presión específica por el coeficiente de presión externa. La ecuación final de la presión externa dependerá del ángulo en el centro del cilindro y de la altura del cilindro ya que la velocidad del viento varía con la altura.

$$w_e = q_p(z_e)c_{pe}$$

$$q_p(z) = \left[1 + 7 \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{0.05}\right)} \right] \frac{1}{2} * 1.25 * (4.902 * \ln\left(\frac{z}{0.05}\right))^2$$

$$c_{pe} = c_{p,0} * 1 = -0.5 + 0.4 * \cos(\alpha) + 0.8 * \cos(2 * \alpha) + 0.3 * \cos(3 * \alpha) - 0.1 * \cos(4 * \alpha) - 0.05 * \cos(5 * \alpha)$$

La presión va a dar en pascales 'Pa'.

4.2.4 Representación gráfica ecuaciones

Gráfica desde el suelo a altura máxima

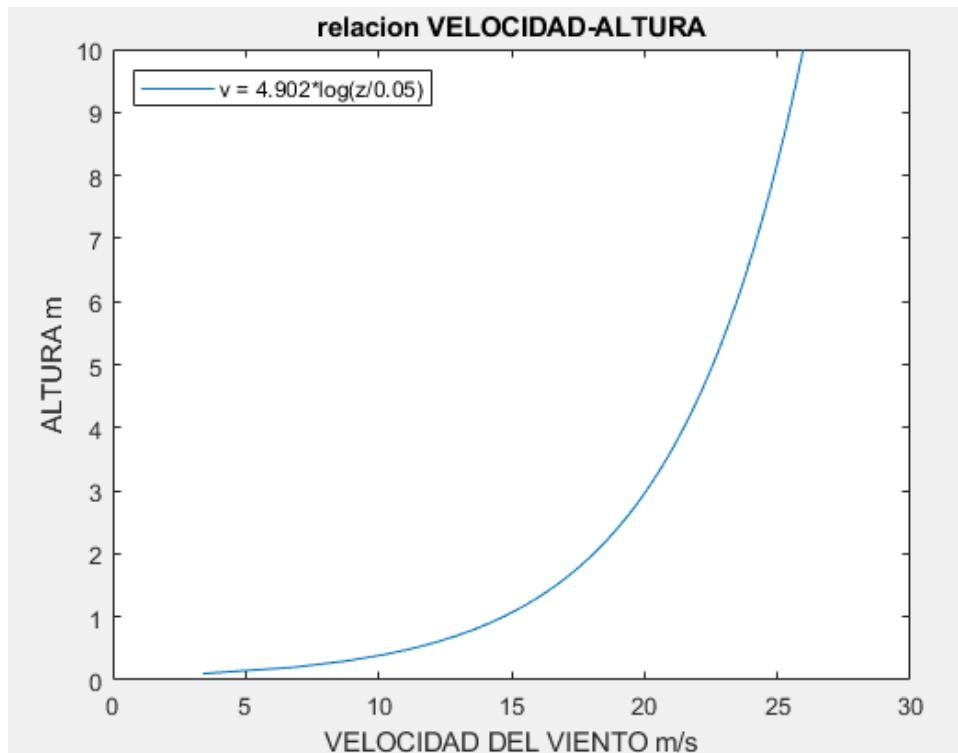


Figura 30: Relación velocidad altura respecto el suelo

Gráfica desde base del recipiente hasta altura máxima

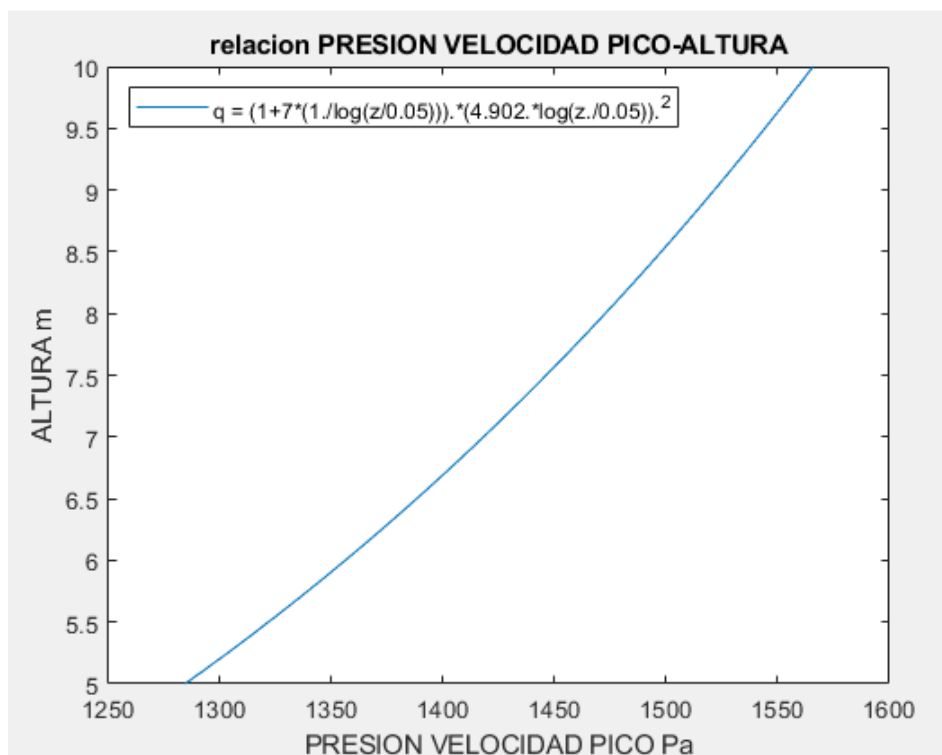


Figura 31: Relación velocidad pico con altura respecto al depósito

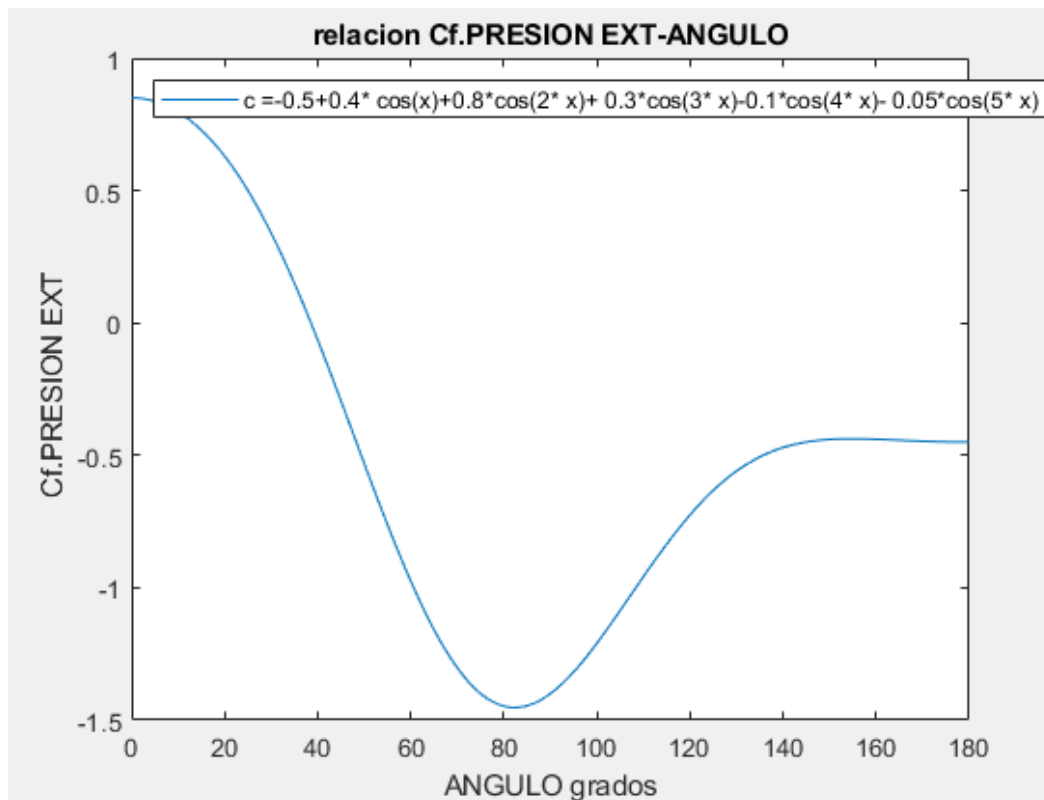


Figura 32: Relación coeficiente de presión exterior con ángulo

Como se observa en las siguientes gráficas, la velocidad aumenta conforme lo hace la altura y, por consiguiente, los hace la presión. También es importante destacar el coeficiente de presión ya que varía conforme al ángulo.

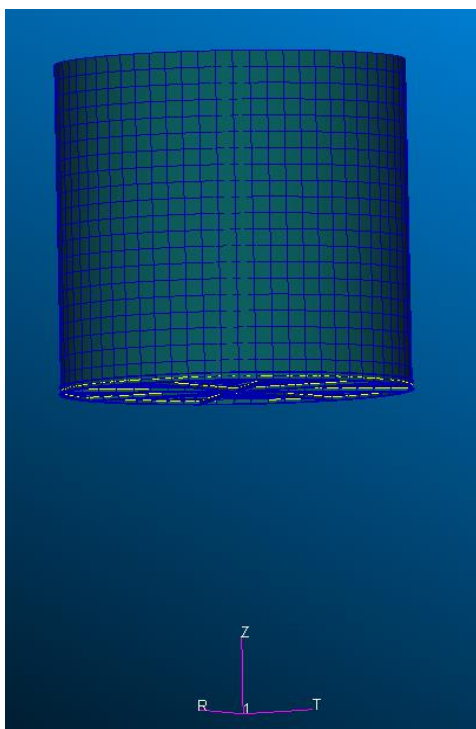


Figura 33: Depósito respecto al sistema de referencia de coordenadas cilíndricas en el suelo

4.2.5 Simulación MEF recipiente del agua acciones del viento

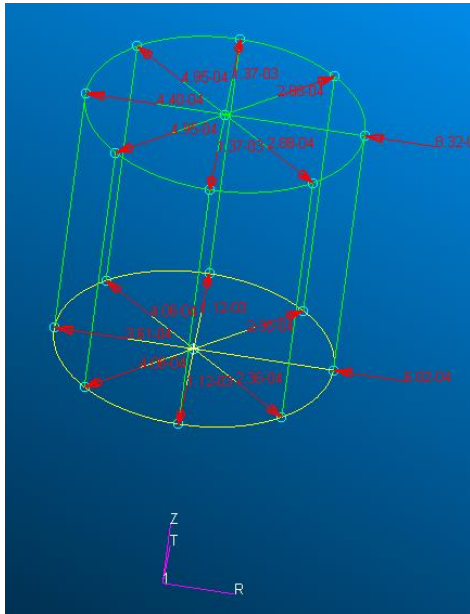
Para la simulación del depósito sometido a la presión ejercida por el viento, se ha considerado que el depósito está elevado, creando un sistema de referencia del cual estaría a la altura del suelo. Cabe destacar que el depósito está a 5m elevado.

A la hora de representar la acción de las cargas, ha sido necesario crear un sistema de referencia de coordenadas cilíndricas donde estaría el suelo, puesto que la presión en las caras del depósito dependerá de la altura y el ángulo. He elegido el origen de coordenadas cilíndricas ya que la presión depende del ángulo.

Ecuación traducida al Nastran y Patran:

$$0.000001 * (1 + 7 * 1 / \text{mth_ln}('Z * 0.001 / 0.05)) * (0.5 * 1.25 * (4.902 * \text{mth_ln}('Z * 0.001 / 0.05)) * (4.902 * \text{mth_ln}('Z * 0.001 / 0.05))) * (-$$

$$0.5+0.4*\text{mth_cosr}(\text{T})+0.8*\text{mth_cosr}(2*\text{T})+0.3*\text{mth_cosr}(3*\text{T})-0.1*\text{mth_cosr}(4*\text{T})-0.05*\text{mth_cosr}(5*\text{T}))$$



Cabe destacar que el viento tiene la dirección del eje 'R' y su sentido en el negativo de este eje, como se muestra en la siguiente imagen.

Dado que el coeficiente de presión es positivo y negativo, en la imagen se observa que hay una presión de positiva en la parte donde impacta el viento por primera vez y que por el resto de la superficie lateral hay una presión negativa de succión ya que el coeficiente de presión es negativo.

Figura 34: Distribución de presiones sobre la superficie generadas por la solicitación del viento

4.2.6 Gráfica final variación presión

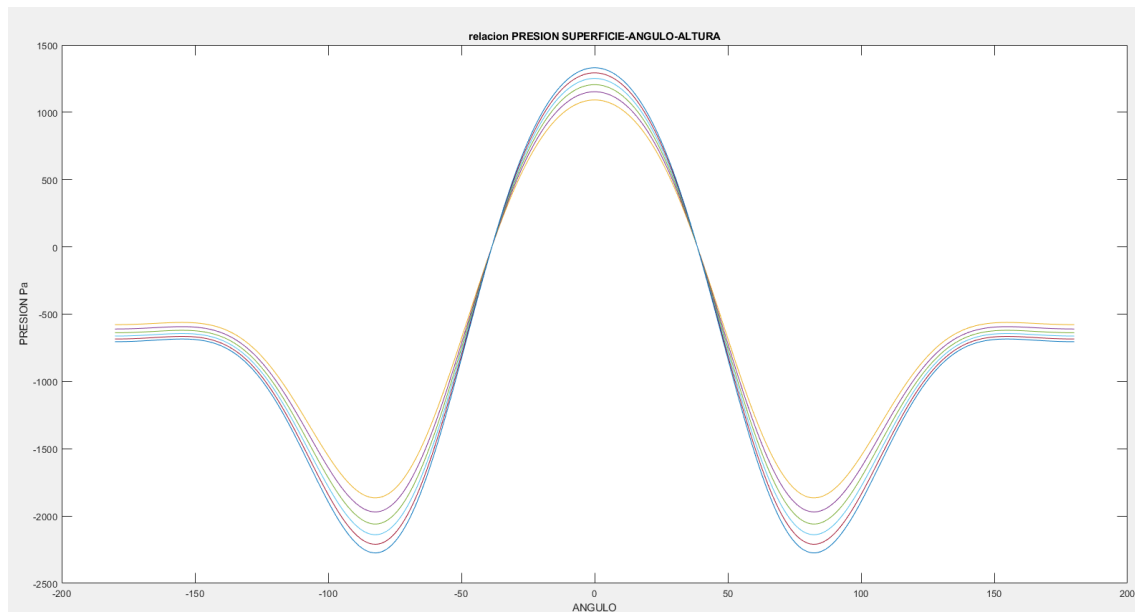


Figura 35: Relación presión superficie - ángulo – altura (0 a 360grados)

En la siguiente imagen se muestra la gráfica de la variación de la presión a distintas alturas y ángulos respecto al centro del depósito. Se observa que la sección que va a estar sometida a mayores esfuerzos es la que esté a mayor altura, por lo que va a sufrir más que el resto.

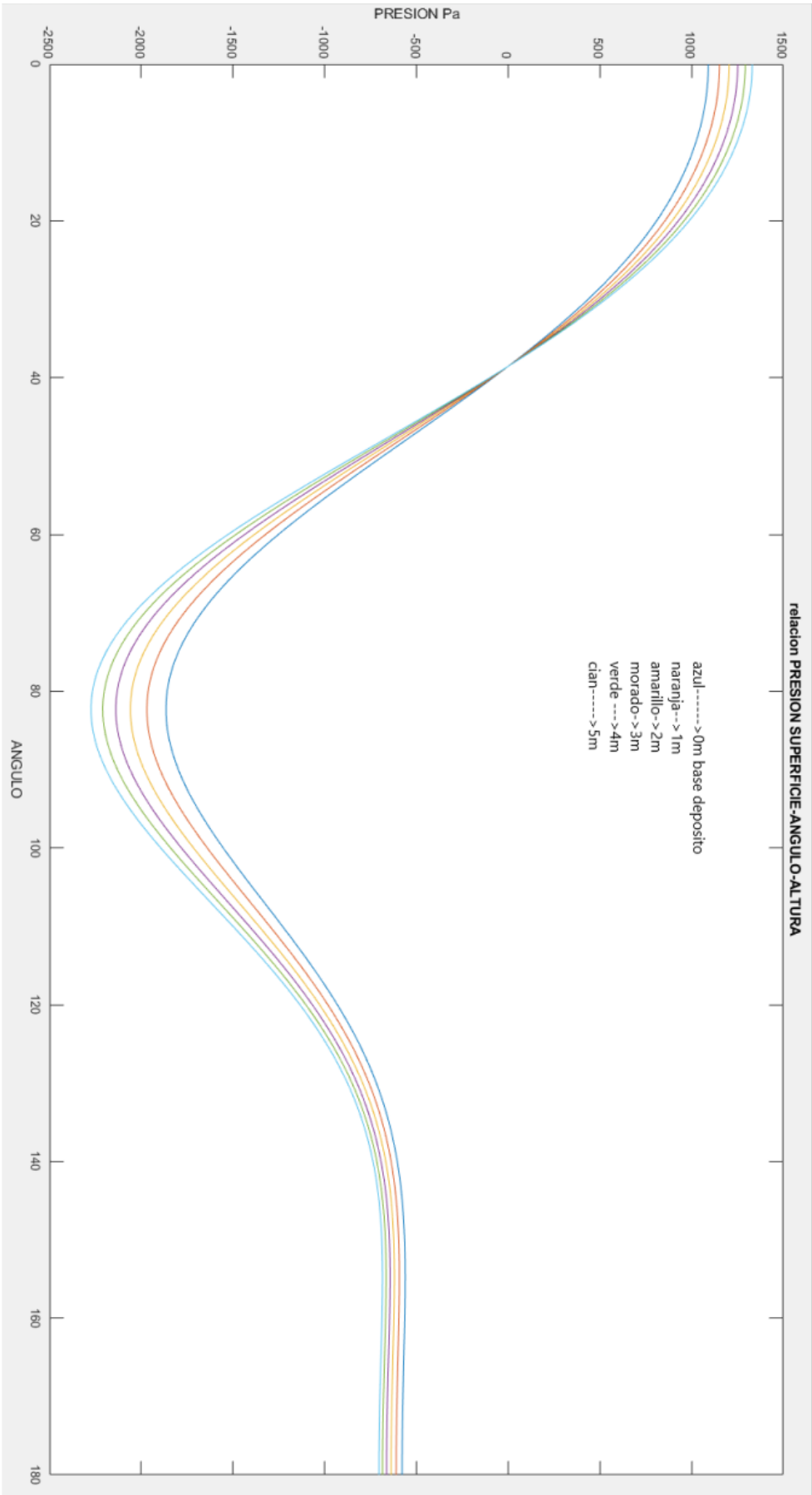


Figura 36: Relación presión superficie - ángulo – altura (0 a 180 grados)

4.2.7 Presión paredes debido al sismo

4.2.8 Efectos de un sismo sobre los depósitos.

Los daños que un terremoto puede causar en tanques de acero pueden expresarse de las siguientes formas:

- a) Grandes tensiones de compresión debido al trabajo de viga del tubo, flectando la pared del tanque en su parte inferior causando el denominado pandeo conocido como “pie de elefante”.
- b) El oleaje del líquido puede dañar tanto el techo como la parte superior de la pared.
- c) La concentración de tensiones que se produce en la zona inferior próxima a los anclajes puede provocar la rotura de la pared.
- d) El cortante originado en la base del depósito puede provocar su deslizamiento. Asimismo, el sismo puede producir el vuelco del tanque si este no está bien anclado.
- e) El levantamiento que se produce en un tanque no anclado o parcialmente anclado puede dañar las conexiones de las tuberías que se introducen desde el exterior, haciendo incompatibles los asientos diferenciales que se experimentan tras el sismo.
- f) El sismo también puede producir la rotura de la unión de la base y la pared debido a tensiones excesivas y causar asientos no uniformes de la cimentación.
- g) Además, como se verá, con el sismo aparecen presiones hidrodinámicas sobre las paredes y el fondo que pueden ser muy importantes y que deberán añadirse a las presiones hidrostáticas para dimensionar correctamente el depósito.

4.2.9 Modelos mecánicos para análisis sísmico de depósitos

La respuesta sísmica de los depósitos y tanques de almacenamiento de líquidos está muy influenciada por la interacción existente entre el fluido y la estructura que le contiene y soporta.

Se requiere de un modelo mecánico que simule, de manera adecuada, dicha interacción.

En la actualidad existen poderosas herramientas de cálculo computacional basadas en el Método de los Elementos Finitos (MEF) que permiten resolver con éxito el problema anterior. Como contrapartida, son necesarias entradas de datos muy exhaustivas, que exigen el conocimiento de las **ecuaciones que definen el problema**, para así introducir correctamente los parámetros hidrodinámicos adecuados.

Así mismo, la salida de los resultados que se obtiene con estas potentes aplicaciones exige un análisis muy detallado de los mismos, para poder extraer los resultados “esenciales” que interesan en el proyecto del depósito.

Las ecuaciones que definen las acciones de las cargas se han desarrollado gracias a modelos mecánicos simplificados (1 o 2 grados de libertad) que reproducen con bastante fidelidad el comportamiento del depósito y el líquido que contiene, frente a las acciones dinámicas.

Además, los valores de los parámetros hidrodinámicos del modelo simplificado se han ido ajustando sucesivamente para que proporcionen una respuesta muy parecida a la que se obtiene con las poderosas aplicaciones de elementos finitos.

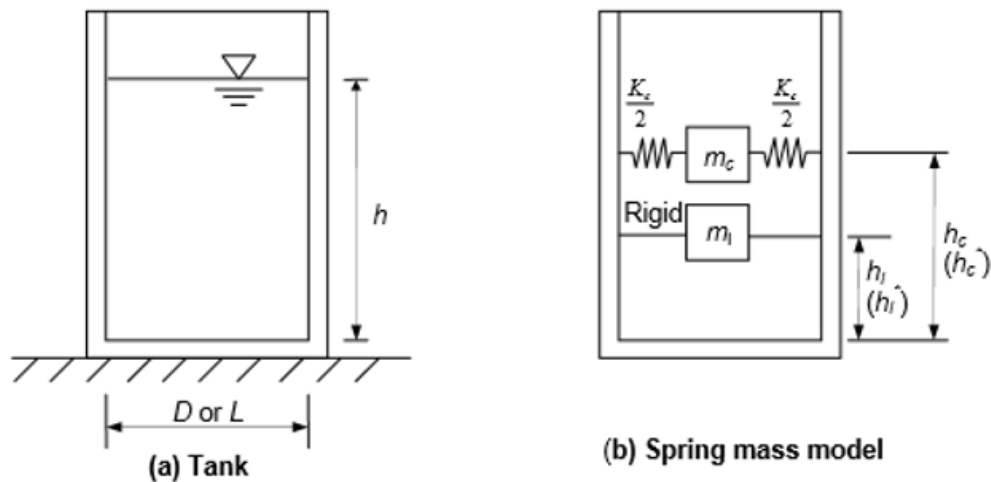


Figura 37: Modelo muelle masa de depósito bajo sismo

Por todo esto, los modelos mecánicos simplificados (*Mass Spring Model*, MSM) siguen utilizándose en la actualidad con preferencia a los modelos más sofisticados, prueba de ello es que son los que recomiendan las principales normas sismorresistentes de depósitos (ACI 350, API 650, Eurocódigo 8, CFE,).

Cuando un tanque conteniendo líquido con superficie libre está sometido a un movimiento sísmico horizontal, el líquido y la pared del depósito tienen una aceleración horizontal. El líquido de la región inferior del tanque se comporta como una masa rígidamente conectada a la pared del depósito. Esta masa del líquido se denomina masa impulsiva y se acelera con la pared induciendo presiones hidrodinámicas sobre la pared del depósito y, también, sobre su base o fondo, que deberán añadirse a las presiones hidrostáticas del líquido.

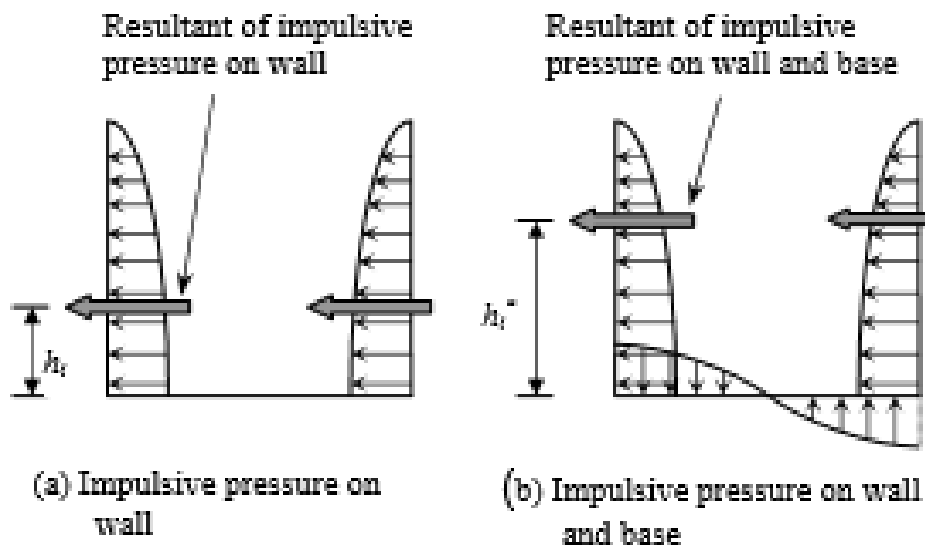


Figura 38: Distribución de presiones pared y base modo impulsivo y convectivo

En la imagen de arriba se muestran las presiones impulsivas en las paredes como en la base, así como su resultante

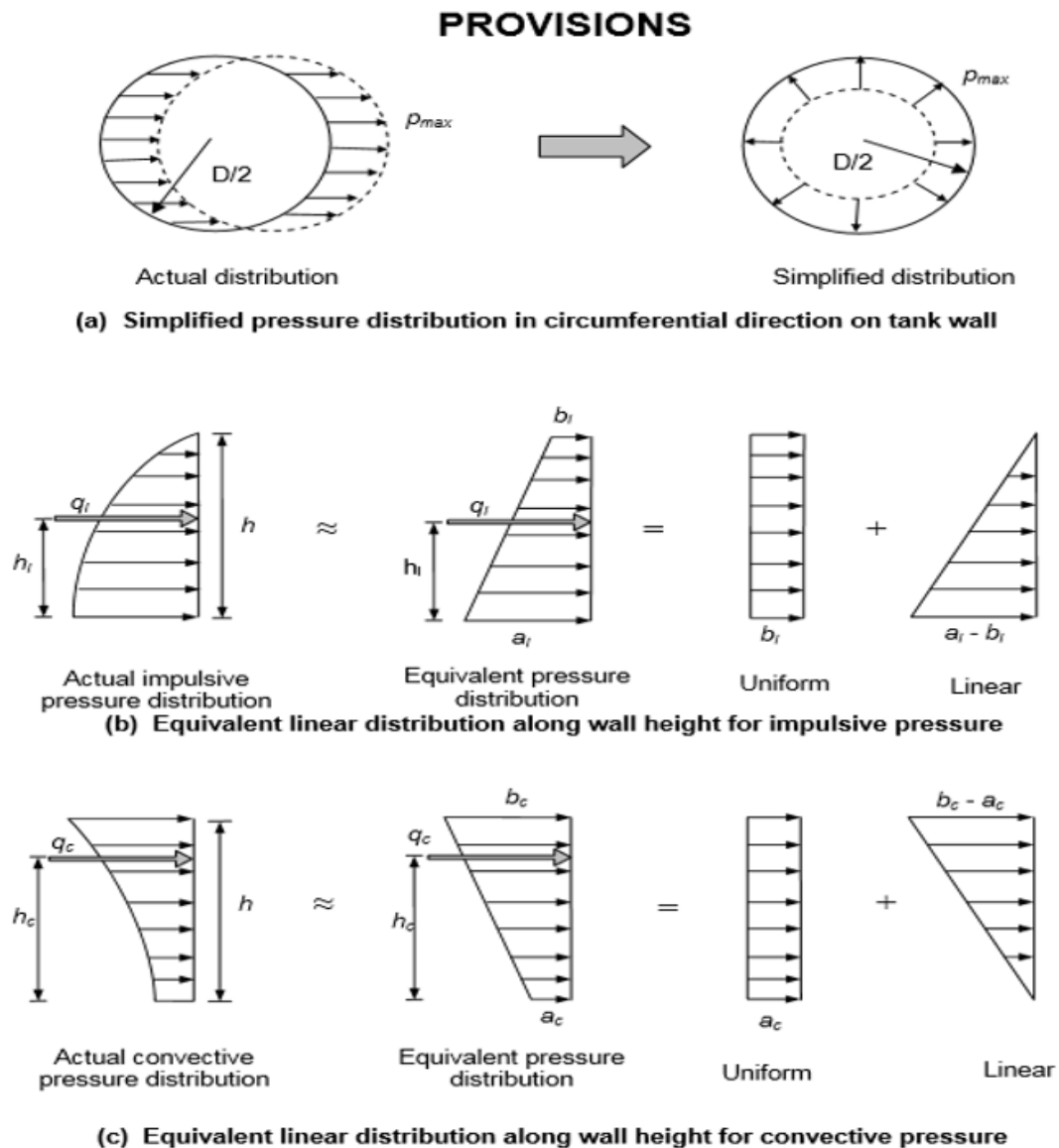


Figura 39: Simplificación de la distribución de presiones pared modo impulsivo y convectivo

La masa de líquido de la región superior del depósito es la que sufre el oleaje de la superficie libre, denominándose masa líquida convectiva, pues ejerce presiones hidrodinámicas convectivas en las paredes y fondo. En la imagen de arriba

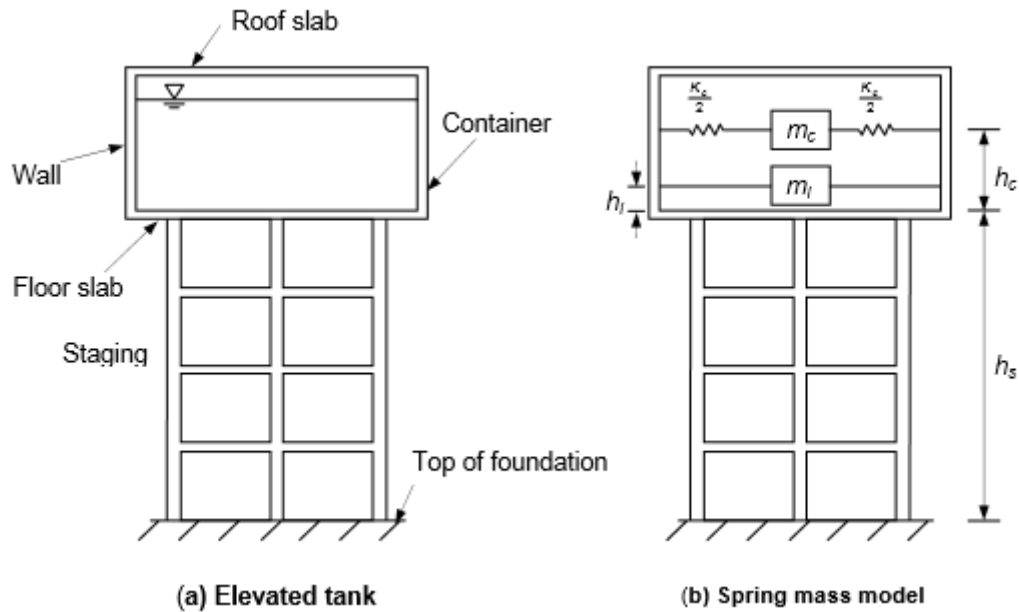


Figura 40: Modelo muelle masa de depósito elevado bajo sismo

la masa convectiva m_c está conectada a la pared del tanque a la altura h_c (o h_c' mediante un muelle de rigidez κ_c). También h_i es la altura de la resultante de las presiones impulsivas actuantes sobre las paredes y sobre el fondo. Y h_s la altura a la que está elevado el depósito.

Simultáneamente, h_c , es la altura de la resultante de la presión convectiva desde la parte inferior de la pared, mientras h_c' es la altura a la que actúa la resultante de la presión convectiva sobre la pared y fondo.

Las alturas h_i y h_c se utilizarán para calcular el momento en la sección inferior de la pared, debido a las presiones hidrodinámicas sobre la pared. Los valores de h_i' y h_c' se utilizarán para calcular el sobre-momento en la base del tanque.

Los parámetros m_i , m_c , h_i , h_i' , h_c , h_c' y κ_c se pueden obtener de la tabla a partir de la geometría del tanque y de su flexibilidad.

Circular tank	Rectangular tank
$\frac{m_i}{m} = \frac{\tanh\left(0.866 \frac{D}{h}\right)}{0.866 \frac{D}{h}}$	$\frac{m_i}{m} = \frac{\tanh\left(0.866 \frac{L}{h}\right)}{0.866 \frac{L}{h}}$
$\frac{h_i}{h} = 0.375 \quad \text{for } h/D \leq 0.75$	$\frac{h_i}{h} = 0.375 \quad \text{for } h/L \leq 0.75$
$= 0.5 - \frac{0.09375}{h/D} \quad \text{for } h/D > 0.75$	$= 0.5 - \frac{0.09375}{h/L} \quad \text{for } h/L > 0.75$
$\frac{h_i^*}{h} = \frac{0.866 \frac{D}{h}}{2 \tanh\left(0.866 \frac{D}{h}\right)} - 0.125$	$\frac{h_i^*}{h} = \frac{0.866 \frac{L}{h}}{2 \tanh\left(0.866 \frac{L}{h}\right)} - 0.125$
$\quad \text{for } h/D \leq 1.33$	$\quad \text{for } h/L \leq 1.33$
$= 0.45 \quad \text{for } h/D > 1.33$	$= 0.45 \quad \text{for } h/L > 1.33$
$\frac{m_c}{m} = 0.23 \frac{\tanh\left(3.68 \frac{h}{D}\right)}{\frac{h}{D}}$	$\frac{m_c}{m} = 0.264 \frac{\tanh\left(3.16 \frac{h}{L}\right)}{\frac{h}{L}}$
$\frac{h_c}{h} = 1 - \frac{\cosh\left(3.68 \frac{h}{D}\right) - 1.0}{3.68 \frac{h}{D} \sinh\left(3.68 \frac{h}{D}\right)}$	$\frac{h_c}{h} = 1 - \frac{\cosh\left(3.16 \frac{h}{L}\right) - 1.0}{3.16 \frac{h}{L} \sinh\left(3.16 \frac{h}{L}\right)}$
$\frac{h_c^*}{h} = 1 - \frac{\cosh\left(3.68 \frac{h}{D}\right) - 2.01}{3.68 \frac{h}{D} \sinh\left(3.68 \frac{h}{D}\right)}$	$\frac{h_c^*}{h} = 1 - \frac{\cosh\left(3.16 \frac{h}{L}\right) - 2.01}{3.16 \frac{h}{L} \sinh\left(3.16 \frac{h}{L}\right)}$
$K_C = 0.836 \frac{mg}{h} \tanh^2\left(3.68 \frac{h}{D}\right)$	$K_C = 0.833 \frac{mg}{h} \tanh^2\left(3.16 \frac{h}{L}\right)$

Tabla 11: Expresiones para sacar los valores del modelo masa muelle

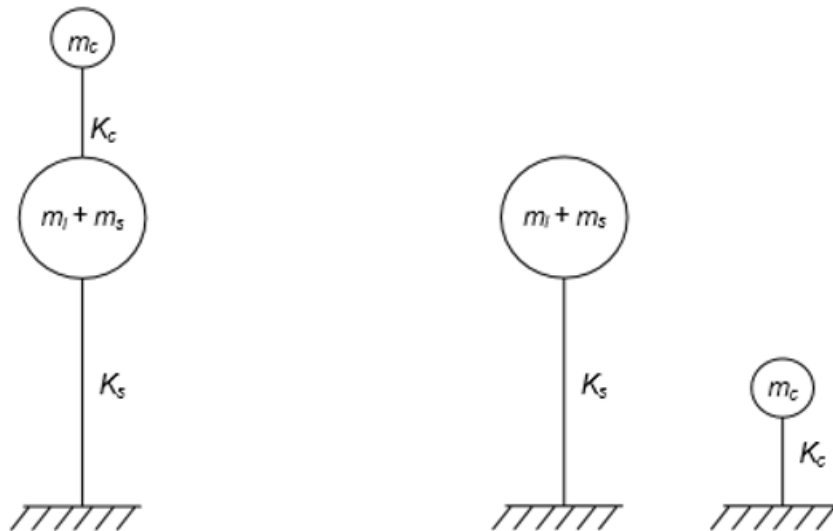


Figura 41: sistema de dos masas idealizado de taque elevado

En el caso de depósitos elevados se utilizará el modelo de dos masas propuesto por Housner y normalmente utilizado por los códigos internacionales, m_s es la masa estructural que comprende la masa del tanque contenedor y un tercio de la masa del soporte. La masa del contenedor incluirá la masa de la cubierta, paredes del depósito y losa del fondo.

4.2.10 Periodos propios impulsivos y convectivos

En el caso de un oscilador simple de masa m y rigidez k , la frecuencia circular de oscilación viene dada por:

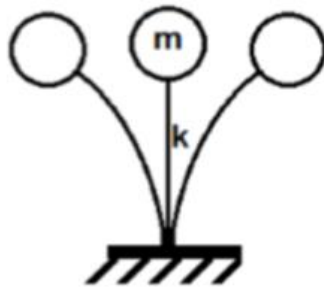


Figura 42: Oscilación simple

Con lo que resulta un periodo propio de oscilación:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

En el modelo Housner se tienen dos masas, una impulsiva y otra convectiva, resultando después de algunas manipulaciones de la fórmula anterior los siguientes periodos

Periodo propio del modo impulsivo en depósitos elevados.

El periodo del modo impulsivo en segundos está dado por:

$$T_i = 2\pi \sqrt{\frac{m_i + m_s}{K_s}}$$

Donde:

m_s =masa del contenedor más un tercio de la masa del soporte.

k_s =rigidez lateral del soporte.

Para determinar dicha rigidez lateral, basta con aplicar una fuerza horizontal en la zona superior del soporte que está conectada al depósito y calcular el desplazamiento lateral unitario de dicho punto. Dicho desplazamiento representa la flexibilidad del soporte y su inversa es precisamente la rigidez buscada. Téngase en cuenta que el soporte del depósito elevado puede ser una sencilla estructura o, en el caso contrario, puede ser una compleja estructura espacial, como en el caso de depósitos elevados sobre edificios de muchas plantas donde el soporte realmente es todo el edificio. Por tanto, en muchos casos hay que recurrir a un programa de cálculo matricial de estructuras para calcular la rigidez del modelo.

Periodo propio del modelo convectivo depósitos elevados circulares.

Por definición se define como:

$$T_c = C_c \sqrt{D/g}$$

Donde C_c coeficiente de periodo de tiempo para el modo convectivo.

$$C_c = \frac{2\pi}{\sqrt{3.68 \tanh(3.68h/D)}}$$

D =diámetro del tanque

h =altura del líquido en el tanque

4.2.11 Cálculo de cargas (tanque lleno)

Para sacar las ecuaciones que definan el comportamiento de las cargas del agua durante un terremoto, se debe tener en cuenta los datos preliminares de densidad del acero y de las cotas de las secciones y de las vigas:

- ❖ Sección de vigas tubulares de perfil 200-9 y acero S275.
- ❖ Sección de perfil IPN-140
- ❖ Sección del depósito circular
- ❖ Medidas de las vigas

En el caso axial-simétrico de depósitos circulares, basta con estudiar el sismo en una dirección diametral.

Densidad del acero= $78,5 \frac{KN}{m^3}$

Densidad del agua=10 $\frac{KN}{m^3}$

Cálculos de los pesos

COMPONENTE	CALCULOS	PESO(KN)
<i>Tapa superior</i>	$(\pi/4) * 5^2 * 0.002 * 78,5$	3,08KN
<i>Pared</i>	$2 * \pi * 2,497 * 0.003 * (5 - 0.002 - 0.011) * 78,5$	18,42KN
<i>Tapa inferior</i>	$(\pi/4) * 5^2 * 0.011 * 78,5$	16,95KN
<i>VIGAS ipn-140</i>	$1,82 * 10^{-3} * (5 * 4 + 2 * \pi * 2,5) * 78,5$	5,10KN
<i>VIGAS tubulares</i>	$4 * 5(\pi * 0,1^2 - \pi * 0,091^2) * 78,5$	8,47KN
<i>VIGAS tubulares</i>	$4 * 3,535(\pi * 0,1^2 - \pi * 0,091^2) * 78,5$	5,99KN
<i>VIGAS tubulares</i>	$4 * 3(\pi * 0,1^2 - \pi * 0,091^2) * 78,5$	5,09KN
<i>Tirantes</i>	$(4,48 * 8(\pi * 0,005^2) + 3,43 * 8(\pi * 0,005^2)) * 78,5$	0.39KN

<i>Peso agua</i>	$(\pi/4) * 5^2 * 5 * 10$	4908KN
<i>Peso vigas</i>	5,18,47+5,99+5,09+0,39	25,05KN
<i>Peso deposito vacío</i>	3,08+18,42+16,95	38,45KN
m_s	38,45+(1/3)*25,04	46,79KN=4679Kg

Tabla 12: Cálculo de pesos

Centro de gravedad el contenedor vacío

$$cdg = \frac{\sum P * d}{\sum P} = \frac{3,08 * 4,999 + 18,42 * 2,5 + 16,95 * 0,0055}{3,08 + 18,42 + 16,95}$$

$$cdg=1,6m$$

$$h_{cd} = 5 + 1,6 = 6,6m$$

Parámetros del modelo muelle masa

$$\text{Peso agua} = m = 4908KN = 4908 * 10^3 N = \frac{4908 * 10^3}{10} = 490800Kg$$

Profundidad del agua h=5m

diámetro interior D=4,999m

$$\frac{h}{d}=1$$

aplicando las ecuaciones de la Tabla C1 y considerando un tanque circular:

$\frac{m_i}{m} = 0,807$	$m_i = 79226Kg$
$\frac{m_c}{m} = 0,229$	$m_c = 22481,8Kg$
$\frac{h_i}{h} = 0,406$	$h_i = 2,03m$
$\frac{h_i^*}{h} = 0,619$	$h_i^* = 3,095m$
$\frac{h_c}{h} = 0,741$	$h_c = 3,775m$
$\frac{h_c^*}{h} = 0,755$	$h_c^* = 3,775m$

Tabla 13: Cálculo de relaciones

$$m_s = \text{masa de recipiente vacío} + \text{un tercio de la masa de andamiage}$$

$$m_s = 38,45Kn + \frac{1}{3} * 25,05Kn = 46,8Kn$$

Rigidez lateral

Se considera rigidez lateral a cómo la fuerza requerida para aplicar en el centro de gravedad de la estructura para obtener una desviación correspondiente.

Para obtener la rigidez lateral se simula el depósito vacío y se observa que bajo una fuerza $F=10Kn$ se obtiene un desplazamiento de 0,18mm por lo que:

$$K_s = \frac{10Kn}{0,18 * 10^{-3}m} = 55555,5 \frac{Kn}{m} = 55,55 * 10^6 \frac{N}{m}$$

Periodos de tiempos

Periodo de tiempo del modo impulsivo:

$$T_i = 2\pi \sqrt{\frac{m_i + m_s}{K_s}} = 2\pi \sqrt{\frac{79226,6 + 4679}{55,55 * 10^6}} = 0,245s$$

Periodo de tiempo del modo convectivo:

$$T_c = C_c \sqrt{\frac{D}{g}}$$

C_c --->Coeficiente convectivo

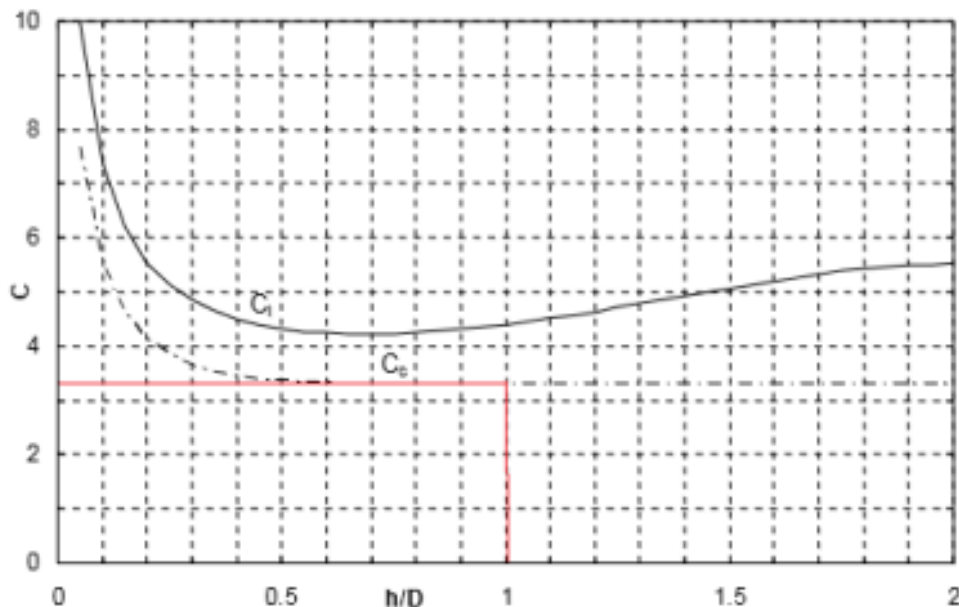


Tabla 14: Relación h/d con coeficiente convectivo

$$T_c = 3,5 \sqrt{\frac{5}{9,81}} = 2,498s$$

Diseño del coeficiente horizontal de sismo

Table 2 Zone Factor, Z
(Clause 6.4.2)

Seismic Zone	II	III	IV	V
Seismic Intensity	Low	Moderate	Severe	Very Severe
Z	0.10	0.16	0.24	0.36

Tabla 15: Factor de zona Z

Diseño del coeficiente horizontal para el modo impulsivo

$$(A_h)_i = \frac{Z}{2} \frac{I}{R} \left(\frac{S_a}{g} \right)_i$$

Z-->es el factor de zona

Considero el factor de zona severo IV por lo que Z=0.24

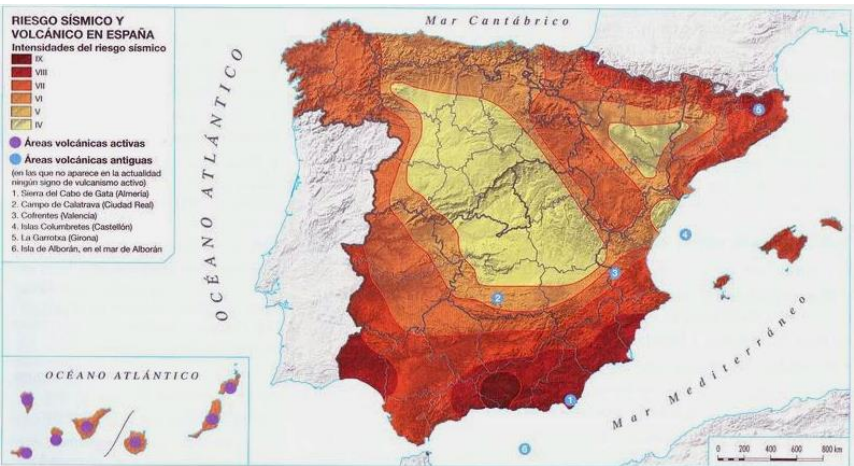


Figura 43: mapa sismo según los factores de zonas

Type of liquid storage tank	I
Tanks used for storing drinking water, non-volatile material, low inflammable petrochemicals etc. and intended for emergency services such as fire fighting services. Tanks of post earthquake importance.	1.5
All other tanks with no risk to life and with negligible consequences to environment, society and economy.	1.0

Tabla 16: Tipo de tanque de almacenamiento

I-->Tipo de tanque de almacenamiento de líquido

Se considera que I es igual a 1,5 ya que es un tanque que se va a utilizar para el almacenamiento y distribución de agua potable y servicios de emergencia.

For hard soil sites

$$S_a/g = 2.5 \quad \text{for } T < 0.4$$
$$= 1.0/T \quad \text{for } T \geq 0.4$$

For medium soil sites

$$S_a/g = 2.5 \quad \text{for } T < 0.55$$
$$= 1.36/T \quad \text{for } T \geq 0.55$$

For soft soil sites

$$S_a/g = 2.5 \quad \text{for } T < 0.67$$
$$= 1.67/T \quad \text{for } T \geq 0.67$$

Ya que se encuentra en el modo impulsivo $T_i = 0,245s$ y considerando la zona de construcción del depósito como sitio de suelo blando.

$$\frac{S_a}{g} = 2,5 \quad \text{para} \quad T=0,245 < 0,67$$

Se considera amortiguación del 2%

Tabla 17: Valor relación S_a/g impulsivo

DISEÑO Y ANALISIS ESTRUCTURAL (FEM) DE DEPOSITO ELEVADO DE AGUA

Table 2 – Response reduction factor, <i>R</i>				
Type of tank				<i>R</i>
Table 2 Zone Factor, <i>Z</i> <i>(Clause 6.4.2)</i>				
Seismic Zone	II	III	IV	V
Seismic Intensity	Low	Moderate	Severe	Very Severe
<i>Z</i>	0.10	0.16	0.24	0.36
Ground supported tank				
Masonry tank				
a) Masonry wall reinforced with horizontal bands				1.3
b) Masonry wall reinforced with horizontal bands and vertical bars at corners and jambs of openings				1.5
RC / prestressed tank				
a) Fixed or hinged/pinned base tank (Figures 6a, 6b, 6c)				2.0
b) Anchored flexible base tank (Figure 6d)				2.5
c) Unanchored contained or uncontained tank (Figures 6e, 6f)				1.5
Steel tank				
a) Unanchored base				2.0
b) Anchored base				2.5
Underground RC and steel tank*				4.0

R-->Factor de reducción de respuesta

Para sacar el valor del factor de reducción de respuestas hay que considerar un tanque elevado soportado sobre un entramado de acero por lo que

R=2,5

$$(A_h)_i = \frac{0,24}{2} \frac{1,5}{2,5} 2,5 = 0,18$$

Tabla 18: Factor de zona tipo de tanque

Diseño del coeficiente horizontal para el modo convectivo

$$(A_h)_c = \frac{Z}{2} \frac{I}{R} \left(\frac{S_a}{g} \right)_c$$

Z-->es el factor de zona

Se vuelve a considerar el factor de zona severo IV por lo que Z=0.24

I-->Tipo de tanque de almacenamiento de líquido

Se considera que I es igual a 1,5 ya que es un tanque que se va a utilizar para el almacenamiento y distribución de agua potable y servicios de emergencia.

For hard soil sites

$$\begin{aligned} S_a/g &= 2.5 & \text{for } T < 0.4 \\ &= 1.0/T & \text{for } T \geq 0.4 \end{aligned}$$

For medium soil sites

$$\begin{aligned} S_a/g &= 2.5 & \text{for } T < 0.55 \\ &= 1.36/T & \text{for } T \geq 0.55 \end{aligned}$$

For soft soil sites

$$\begin{aligned} S_a/g &= 2.5 & \text{for } T < 0.67 \\ &= 1.67/T & \text{for } T \geq 0.67 \end{aligned}$$

Ya que se encuentra en el modo impulsivo $T_c = 2,498s$ y considerando la zona de construcción del depósito como sitio de suelo blando

$$\frac{S_a}{g} = \frac{1,67}{T}$$

para $T=2,498 \geq 0,67$

Tabla 19: Valor relación S_a/g impulsivo convectivo

Se considera amortiguación del 0,5% por lo que se debe multiplicar por un factor de 1,75

Table 2 – Response reduction factor, R

Type of tank	R
Elevated tank	
Tank supported on masonry shaft	
a) Masonry shaft reinforced with horizontal bands	1.3
b) Masonry shaft reinforced with horizontal bands and vertical bars at corners and jambs of openings	1.5
Tank supported on RC shaft	
RC shaft with two curtains of reinforcement, each having horizontal and vertical reinforcement	1.8
Tank supported on RC frame^a	
a) Frame not conforming to ductile detailing, i.e., ordinary moment resisting frame (OMRF)	1.8
b) Frame conforming to ductile detailing, i.e., special moment resisting frame (SMRF)	2.5
Tank supported on steel frame^a	2.5
Ground supported tank	
Masonry tank	
a) Masonry wall reinforced with horizontal bands	1.3
b) Masonry wall reinforced with horizontal bands and vertical bars at corners and jambs of openings	1.5
RC / prestressed tank	
a) Fixed or hinged/pinned base tank (Figures 6a, 6b, 6c)	2.0
b) Anchored flexible base tank (Figure 6d)	2.5
c) Unanchored contained or uncontained tank (Figures 6e, 6f)	1.5
Steel tank	
a) Unanchored base	2.0
b) Anchored base	2.5
Underground RC and steel tank^a	4.0

$R \rightarrow$ Factor de reducción de respuesta

Para sacar el valor del factor de reducción de respuestas hay que considerar que hay un tanque elevado soportado sobre un entramado de acero por lo que

$$R=2,5$$

$$(A_h)_c = \frac{0,24}{2} \frac{1,5}{2,5} \left(\frac{1,67}{2,498} \right) 1,75 = 0,08$$

Tabla 20: Factor de reducción de respuesta

Cortante en base

Considerando la masa líquida impulsiva, m_i , juntamente con la masa m_s y el coeficiente horizontal para el modo impulsivo se obtiene el cortante impulsivo, V_i .

El cortante convectivo en la base, V_c , sólo será producido por la masa convectiva, m_c , y el coeficiente horizontal para el modo convectivo.

Por un lado, el coeficiente horizontal para el modo impulsivo $(A_h)_i$, obtenida de un espectro para amortiguamiento del 2% para acero, o del 5% para hormigón, para el periodo impulsivo T_i del sistema.

Por otro lado, coeficiente horizontal para el modo convectivo $(A_h)_c$ (amortiguamiento del 0,5%) obtenida para el periodo convectivo, T_c , del sistema.

Cortante en base modo impulsivo tanque elevado

$$V_i = (A_h)_i (m_i + m_s) g$$

$$V_i = (0.18)(79226 + 4679)9.81 = 148.2 \text{KN}$$

Cortante en base modo convectivo tanque elevado

$$V_c = (A_h)_c (m_c) g$$

$$V_c = (0.08)(22481.8)9.81 = 17.6 \text{KN}$$

Cortante total en base

$$V = \sqrt{V_i^2 + V_c^2}$$

$$V = 150.03 \text{KN}$$

Momento en base

Se consideran los brazos h_i^* y h_c^* correspondientes a la actuación de las presiones hidrostáticas sobre las paredes y el fondo.

Se consideran los brazos h_i y h_c correspondientes a la actuación de las presiones hidrostáticas sobre las paredes.

Y se consideran h_{cg}

PRESIÓN IMPULSIVA

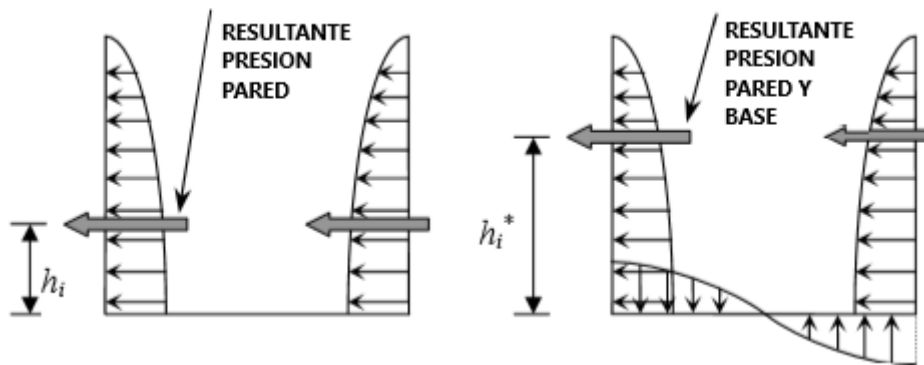


Figura 44: Distribución de presiones modo impulsivo

PRESIÓN CONVECTIVA

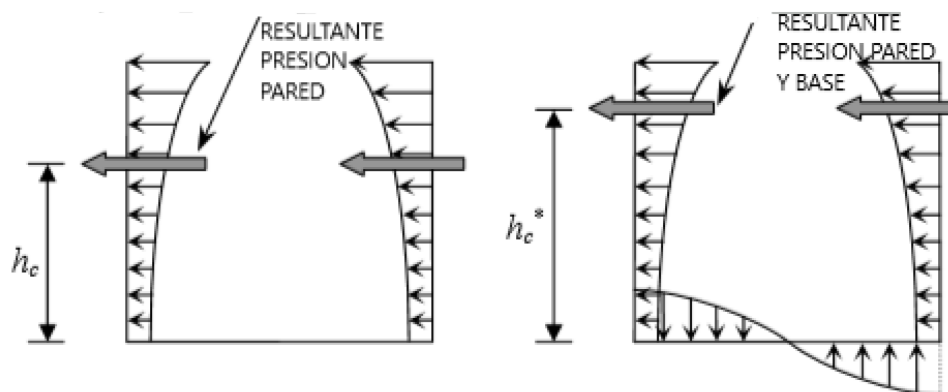


Figura 45: Distribución de presiones modo convectivo

Momento de vuelco en la base modo impulsivo

$$M_i^* = (A_h)_i [m_i(h_i^* + h_s) + m_s h_{cg}]g$$

$$M_i^* = 0.18[79226(3.095 + 5) + 4679(6.6)]9.81 = 1186\text{KNm}$$

Momento de vuelco en la base modo convectivo

$$M_c^* = (A_h)_c [m_c(h_c^* + h_s)]g$$

$$M_c^* = 0.08[22481.8(3.775 + 5)]9.81 = 154.8\text{KNm}$$

Momento de vuelco total

$$M = \sqrt{(M_i^*)^2 + (M_c^*)^2}$$
$$M = 1196\text{KNm}$$

Presión Hidrodinámica

Presión Hidrodinámica Impulsiva

$$Q_{iw(y)} = 0.866[1 - (\frac{y}{h})^2] * \tanh(0.866 \frac{D}{h})$$

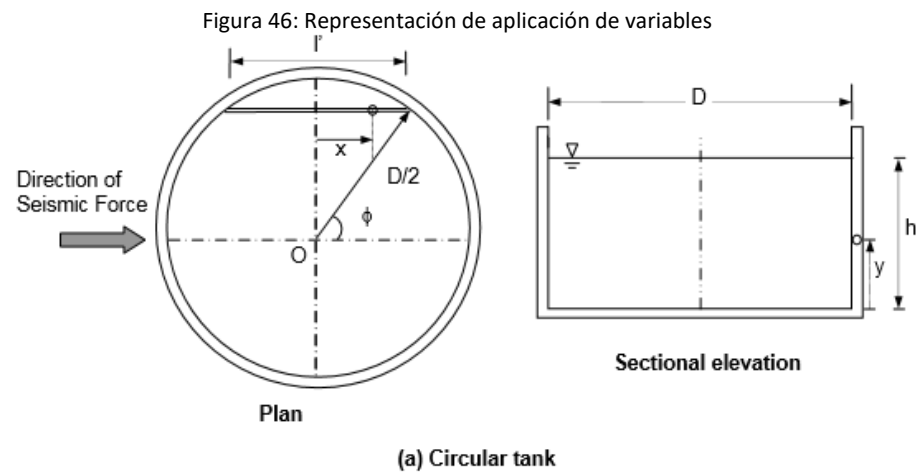
P. Pared $P_{iw(y)} = Q_{iw(y)} * (A_h)_i * \rho g h * \cos(\varphi)$

P. Base $P_{ib} = 0.866(A_h)_i * \rho g h \frac{\sinh(1.732 \frac{x}{h})}{\cosh(0.866 \frac{l'}{h})}$

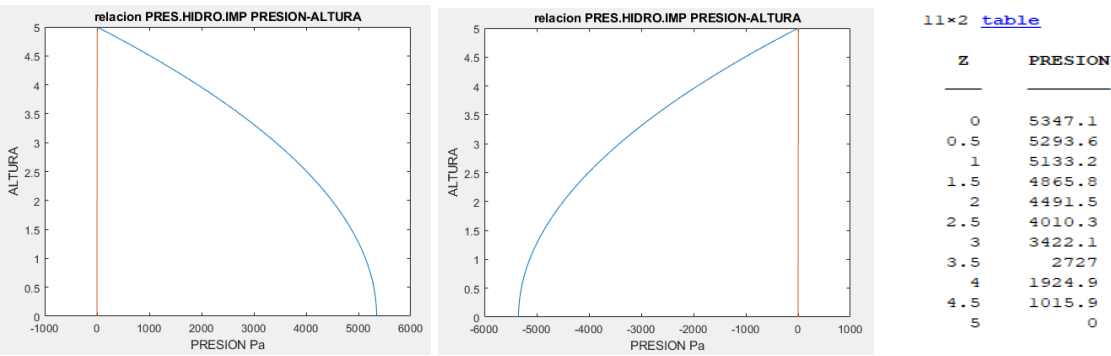
nYp carencia sinh y cosh transformo

Estudio sección crítica

Presión hidrodinámica impulsiva pared $\varphi = 0$ Presión hidrodinámica impulsiva pared



$\varphi = 180$



$P_{iw \max} = 5347 \text{ Pa}$
 $P_{iw \min} = 0 \text{ Pa}$

$y = 0 \text{ m}$
 $y = 5 \text{ m}$

$P_{iw \max} = 5347 \text{ Pa}$
 $P_{iw \min} = 0 \text{ Pa}$

$y = 0 \text{ m}$
 $y = 5 \text{ m}$

Figura 47: Distribución de presiones impulsivas en pared plano central

Presión hidrodinámica impulsiva base $l' = 5$

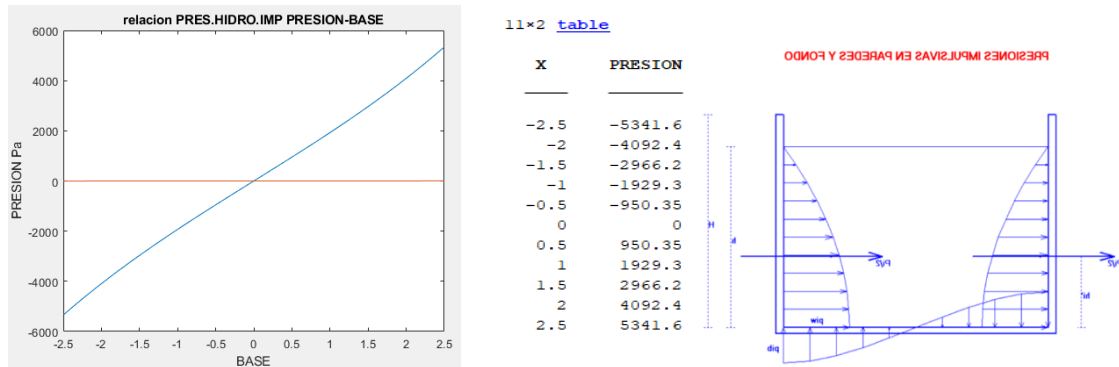


Figura 48: Distribución de presiones impulsivas en base plano central

$P_{ib \max} = 5341 \text{ Pa}$ $x = 2.5 \text{ m}$
 $P_{ib \min} = 0 \text{ Pa}$ $x = 0 \text{ m}$

Presión Hidrodinámica convectivo

$$Q_{cw(y)} = 0.5625 \frac{\cosh(3.674 \frac{y}{D})}{\cosh(3.674 \frac{h}{D})}$$

P. Pared $P_{cw} = Q_{cw(y)} * (A_h)_c * \rho g h * [1 - \frac{1}{3} \cos^2(\varphi)] \cos(\varphi)$

$$Q_{cb(x)} = 1.125 [\frac{x}{D} - \frac{4}{3} (\frac{x}{D})^3] * \sinh(3.674 \frac{h}{D})$$

P. Base $P_{cb} = Q_{cb(x)} * (A_h)_c * \rho g D$

Estudio sección crítica

Presión hidro. convectiva pared $\varphi = 0$

Presión hidro. convectiva pared $\varphi = 180$

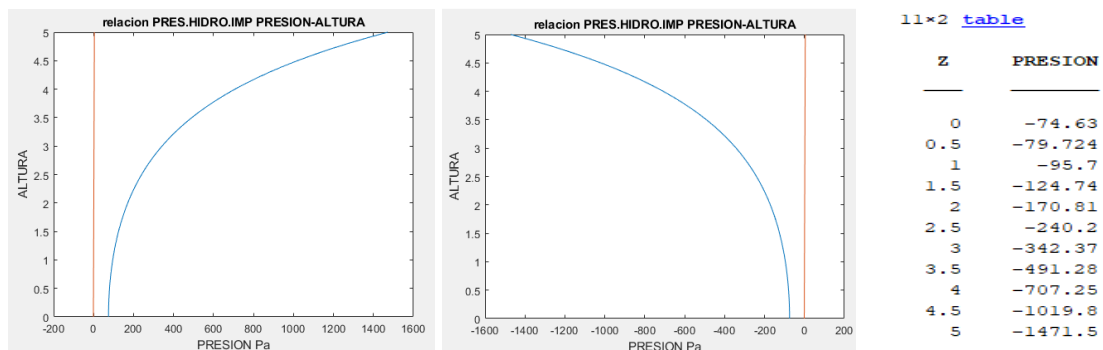


Figura 49: Distribución de presiones convectivas en pared plano central

$P_{cw \max} = 1471 \text{ Pa}$ $y = 5 \text{ m}$ $P_{cw \max} = 1471 \text{ Pa}$ $y = 5 \text{ m}$
 $P_{cw \min} = 74,63 \text{ Pa}$ $y = 0 \text{ m}$ $P_{cw \min} = 74,63 \text{ Pa}$ $y = 0 \text{ m}$

Presión hidrodinámica impulsiva base

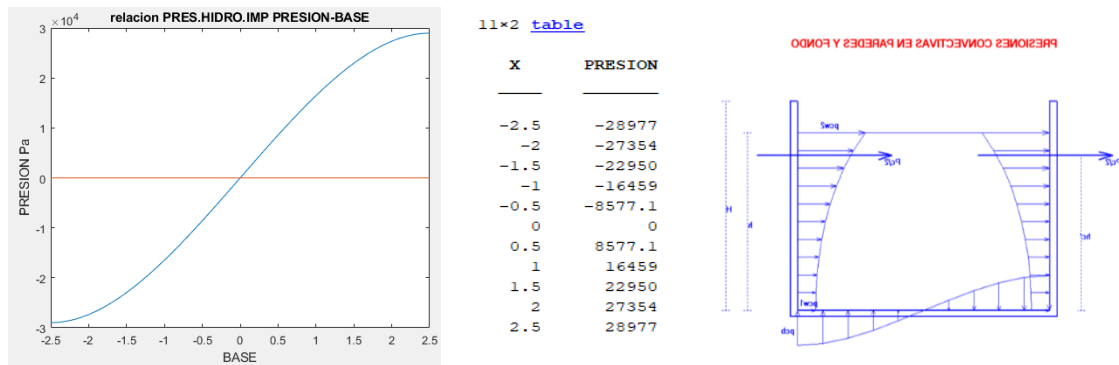


Figura 50: Distribución de presiones convectivas en base plano central

$$P_{cb \max} = 28977 \text{ Pa} \quad x = 2,5 \text{ m}$$

$$P_{cb \min} = 0 \text{ Pa} \quad x = 0 \text{ m}$$

Presión debido a la inercia de la pared

Esta presión está distribuida uniformemente a lo largo de la altura de la pared

$$P_{ww} = (A_h)_i * t * \rho_m * g$$

$t \rightarrow$ espesor pared

$\rho_m \rightarrow$ densidad material pared

$$P_{ww} = 0.18 * 0.003 * 78,5 = 42.39 \text{ Pa}$$

Presión debido a excitación vertical

$$P_v = (A_v)[\rho g h (1 - \frac{y}{h})]$$

$$(A_v) = \frac{2}{3} \left(\frac{Z I S_a}{2 R g} \right)$$

Según la norma en tanques de acero se puede considerar despreciable

Máxima presión hidrodinámica

El valor máximo de la presión hidrodinámica debe obtenerse combinando la presión debido a la excitación horizontal y vertical a través de la raíz cuadrada de la suma de cuadrados. La máxima presión hidrodinámica está en la base del depósito

- ❖ P_{iw} = presión de la masa líquida impulsiva sobre las paredes.
- ❖ P_{cw} = presión de la masa líquida convectiva sobre las paredes.
- ❖ P_{ww} = presión debida a la inercia de las paredes.
- ❖ P_v = presión horizontal sobre las paredes debida a la aceleración vertical A_v .
- ❖ P = presión total sobre las paredes. Se utiliza la regla de la raíz de la suma del cuadrado de los componentes:

$$P = \sqrt{(P_{iw} + P_{ww})^2 + P_{cw}^2 + P_v^2}$$

$$\text{Presión base} \quad P_b = \sqrt{(5347 + 42,39)^2 + 74,63^2 + 0^2} = 5389,9 \text{ Pa}$$

Presión hidrostática base $P_p = \rho * g * h = 1000 * 9.81 * 5 = 49050 \text{ Pa}$

$$Diferencia_din_est_ \% = \left(1 - \frac{49050 - 5389,9}{49050}\right) * 100 = 10,98\%$$

La máxima presión hidrodinámica es un once por ciento aproximada a la presión hidrostática en la base.

Altura de ola

$$d_{max} = (A_h)_c * R * \frac{D}{2}$$

$$d_{max} = 0.08 * 2.5 * \frac{5}{2} = 0.5m$$

Por lo que se necesita una altura de pared libre de 0,5m que por seguridad se tendrá que sobredimensionar.

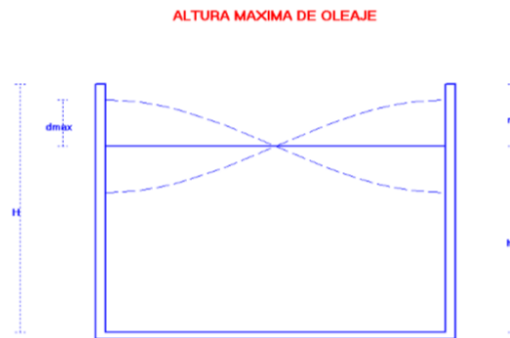


Figura 51: Altura de ola

4.2.12 Cálculo de cargas (tanque vacío)

Para la condición de tanque vacío se considerará solo un sistema de un grado de libertad. La situación de depósito vacío pudiera ser crítica en algunos casos especiales, en particular con tanques elevados, por lo que se calculan el cortante, V, y el momento, M, en la base de soporte.

Periodo de tiempos

$$T_i = 2\pi \sqrt{\frac{m_s}{K_s}} = 2\pi \sqrt{\frac{4679}{55,55 * 10^6}} = 0,057s$$

Diseño del coeficiente horizontal de sismo

$$(A_h)_i = \frac{Z}{2} \frac{I}{R} \left(\frac{S_a}{g}\right)_i$$

$$(A_h)_i = \frac{0,24}{2} \frac{1,5}{2,5} 2,5 = 0,18$$

El mismo que se había calculado antes

Cortante en base

$$V_i = (A_h)_i (m_s) g$$

$$V_i = (0.18)(4679)9.81 = 8,2KN$$

Momento en base

$$M^* = (A_h)_i [m_s h_{cg}] g$$

$$M^* = 0.18[4679(6.6)]9.81 = 54,53 \text{KNm}$$

Dado que el cortante de base total (150.03KN) y el momento de base (1196KNm) en la condición de tanque lleno es mayor que el cortante de base total (8,2KN) y el momento de base (54,53KNm) en condición de tanque vacío, el diseño se regirá por consiguiente a través del tanque completamente lleno.

4.2.13 Simulación MEF recipiente del agua acciones del sismo

A la hora de representar las ecuaciones de las presiones en el programa hay un problema, puesto que Nastran y Patran no tienen las funciones de seno hiperbólico y coseno hiperbólico, por lo que hay que utilizarlas según la función natural exponencial es decir:

$$\sinh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$$

$$\cosh(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$$

❖ P_{iw} = presión de la masa líquida impulsiva sobre las paredes (MPa).

Ecuación sustituida

$$P_{iw(y)} = \left[0.866 * \left[1 - \left(\frac{y}{5} \right)^2 \right] \tanh(0.866) \right] 0.18 * 1000 * 9.8 * 5 * \cos(\varphi) * 10^{-3}$$

Código

$$(0.866*(1-(Z/5000)*(Z/5000)))*0.69933)*0.18*1000*9.8*5*mth_cosr('T')*10.^{-6}$$

Para representarlo necesitamos un sistema de coordenadas cilíndricas en la base del depósito.

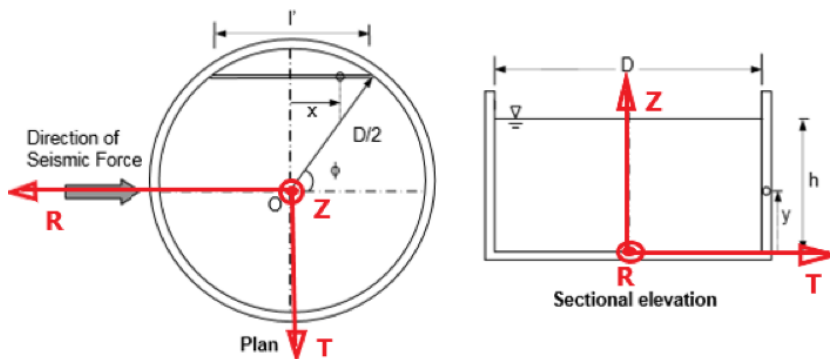


Figura 52: Sistema de referencia de coordenadas cilíndricas base

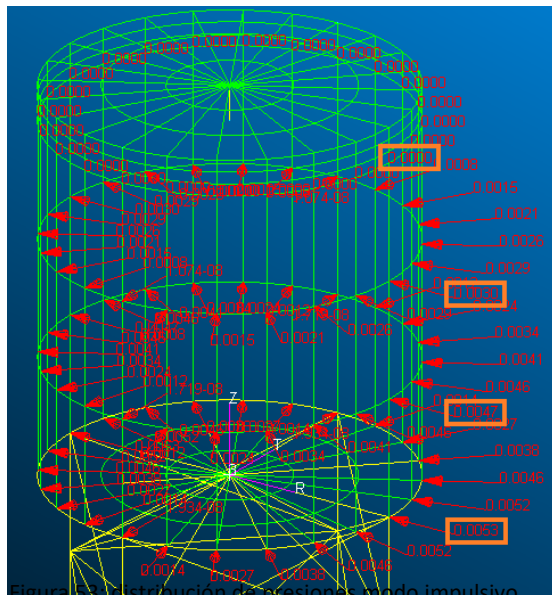


Figura 53: distribución de presiones modo impulsivo sobre pared y marcado de valores del plano central

En la siguiente imagen se muestra el centro de coordenadas cilíndricas y los valores de las presiones en el plano más crítico del depósito, es decir, el plano coincidente con la dirección del sismo.

Se puede observar que los valores de estas presiones son coincidentes a los cálculos anteriores realizados en Matlab.

❖ P_{ib} = presión de la masa líquida impulsiva sobre la base (MPa).

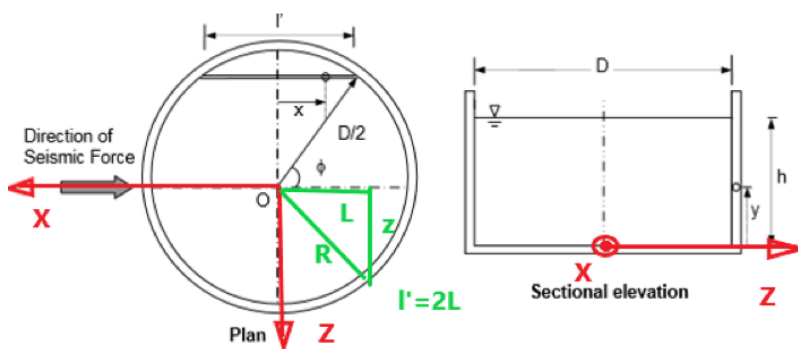
Ecuación sustituida

$$P_{ib(x)} = 0.866 * 0.18 * 1000 * 9.8 * 5 * \frac{e^{1.732 \frac{x}{5}} - e^{-1.732 \frac{x}{5}}}{e^{0.866 \frac{2 * \sqrt{2.5^2 - z^2}}{5}} + e^{-0.866 \frac{2 * \sqrt{2.5^2 - z^2}}{5}}} * 10^{-3}$$

Código

```
(0.866*0.18*1000*9.8*5*((mth_exp(1.732*X/5000)-mth_exp(-1.732*X/5000))/((mth_exp(0.866*2*mth_sqrt(2.5*2.5-(Z/1000)*(Z/1000))/5)+ mth_exp(-0.866*2*mth_sqrt(2.5*2.5-(Z/1000)*(Z/1000))/5))))*10.^-6
```

También para representar esta presión se necesita un sistema de coordenadas cartesianas en la base.



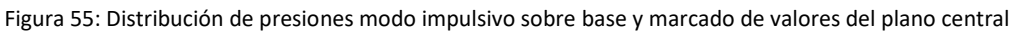
Para sacar l' en función del eje Z se debe aplicar Pitágoras tal que:

$$R^2 = L^2 + z^2$$

$$L = \sqrt{R^2 - z^2}$$

$$l' = 2 * L = 2\sqrt{R^2 - z^2}$$

Figura 54: Sistema de referencia de coordenadas cartesianas base

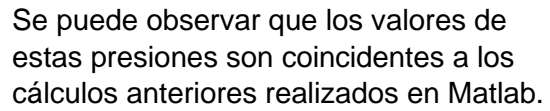


Se puede observar que los valores de estas presiones son coincidentes a los cálculos anteriores realizados en Matlab.

Ecuación sustituida

Código

Para representarlo se necesita un sistema de coordenadas cilíndricas en la base del depósito, para lo que se utiliza el mismo que el utilizado en la presión de la masa líquida impulsiva en las paredes del depósito.



- ❖ P_{cb} = presión de la masa líquida convectiva sobre la base (MPa).

$$P_{cb(x)} = 1.125 \left[\frac{x}{5} - \frac{4}{3} \left(\frac{x}{5} \right)^3 \right] * \sinh(3.674) * 0.08 * 1000 * 9.8 * 5 * 10^{-3}$$
$$1.125 * ((X/5000) - ((4/3) * (X/5000) * (X/5000) * (X/5000))) * 19.6919 * 0.0711 * 1000 * 9.8 * 5 * (10.^{-6})$$

Pág. 60 de 92

En la imagen se muestra el centro de coordenadas cartesianas y los valores de las presiones en el plano más crítico del depósito, es decir, el plano coincidente con la dirección del sismo.

Se puede observar que los valores de estas presiones son coincidentes a los cálculos anteriores realizados en Matlab.

❖ P_{ww} = presión debida a la inercia de las paredes.

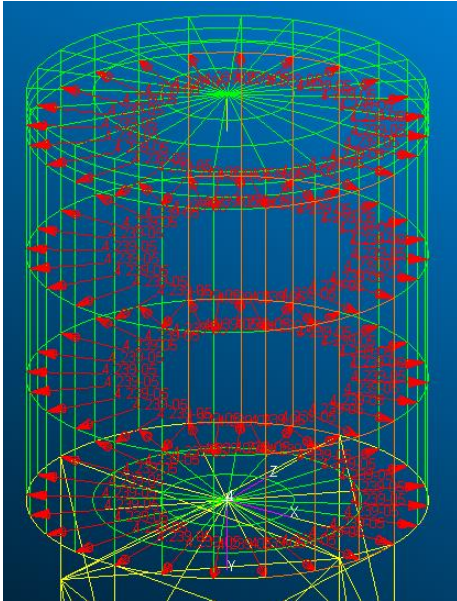


Figura 58: Distribución de presiones P_{ww}

Ecuación sustituida

$$P_{ww} = 0.18 * 0.003 * 78,5 = 42.39 \text{ Pa}$$

Código

$$P_{ww} = 42.39 * 10^{-6} \text{ Mpa}$$

Esta presión está distribuida uniformemente a lo largo de la altura de la pared

4.2.14 Presión techo debida a la nieve

Puesto que en la zona de construcción del depósito suele haber nevadas ligeras se va a considerar la presión ejercida sobre el techo del depósito. En concreto se considera un espesor de 20cm de nieve vieja que tiene una densidad de 500Kg/m^3 .

$$P_{\text{techo}} = \rho * g * h = \frac{500 * 9.8 * 0.2}{10^6} = 0.00098 \text{ Mpa}$$

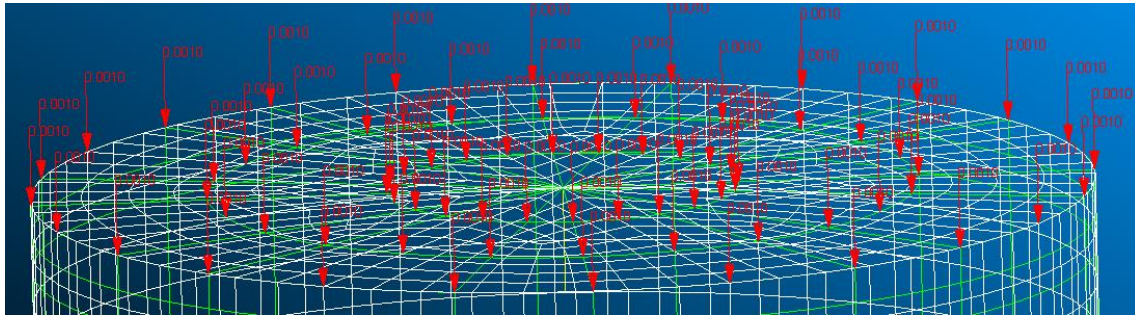


Figura 59: Distribución de presiones techo

Como se observa en la imagen, la presión esta uniformemente distribuida.

4.3 SIMULACIÓN MEF Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS

A la hora de simular el depósito bajo la solicitación de las cargas hay unas ecuaciones que van a tener una dirección de la solicitación constante como puede ser la presión hidrostática o la presión a causa de la nieve; sin embargo, las solicitaciones generadas por el viento y el sismo varían según la dirección de aplicación, por lo que se puede tener varios estados críticos cuando estas sean coincidentes, opuesta o ninguna de las dos.

Es decir, a la hora de simular se deberá tener en cuenta estas condiciones y observar los resultados.

Estados críticos:

- ❖ Aplicación viento y sismo coincidentes más hidrostática y nieve.
- ❖ Aplicación viento y sismo opuestos más hidrostática y nieve.
- ❖ Aplicación viento y sismo 90 grados más hidrostática y nieve.

Aplicación viento y sismo coincidentes más hidrostática y nieve.

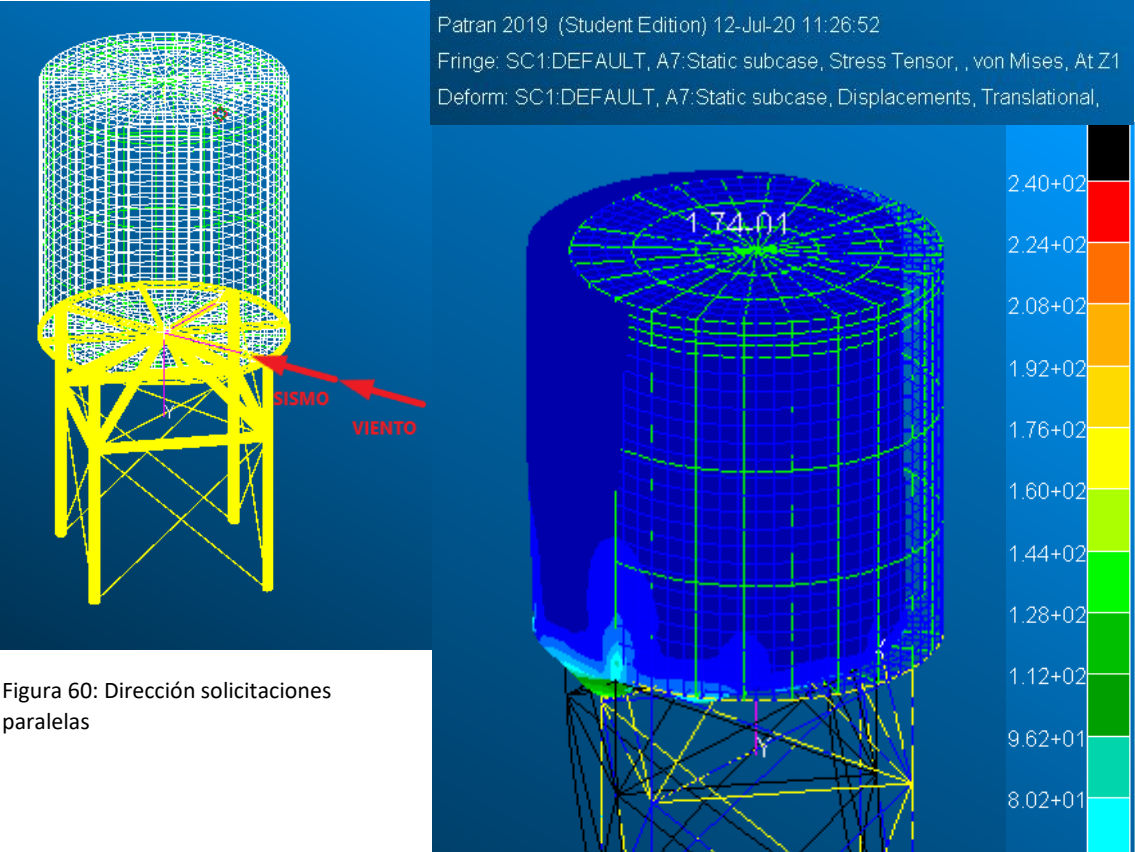


Figura 60: Dirección solicitaciones paralelas

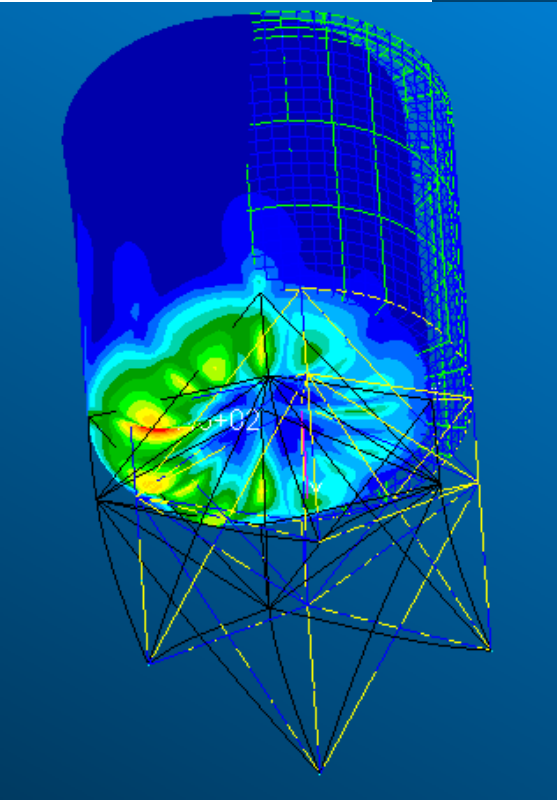
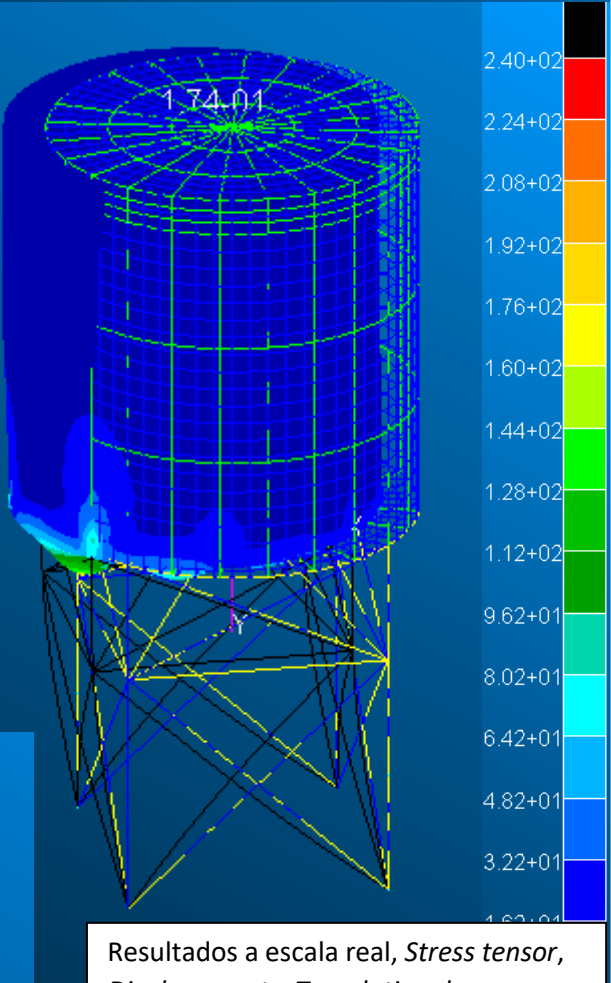


Figura 62: Resultados 2 ficticios deformación y tensiones (direcciones paralelas)



Resultados a escala real, *Stress tensor, Displacements, Translational*

Figura 61: Resultados 1 ficticios deformación y tensiones (direcciones paralelas)

Cabe destacar que la escala de la de los desplazamientos es ficticia por lo que no son resultados a escala 1:1.

Resultados a escala ficticia, *Stress tensor, Displacements, Translational*

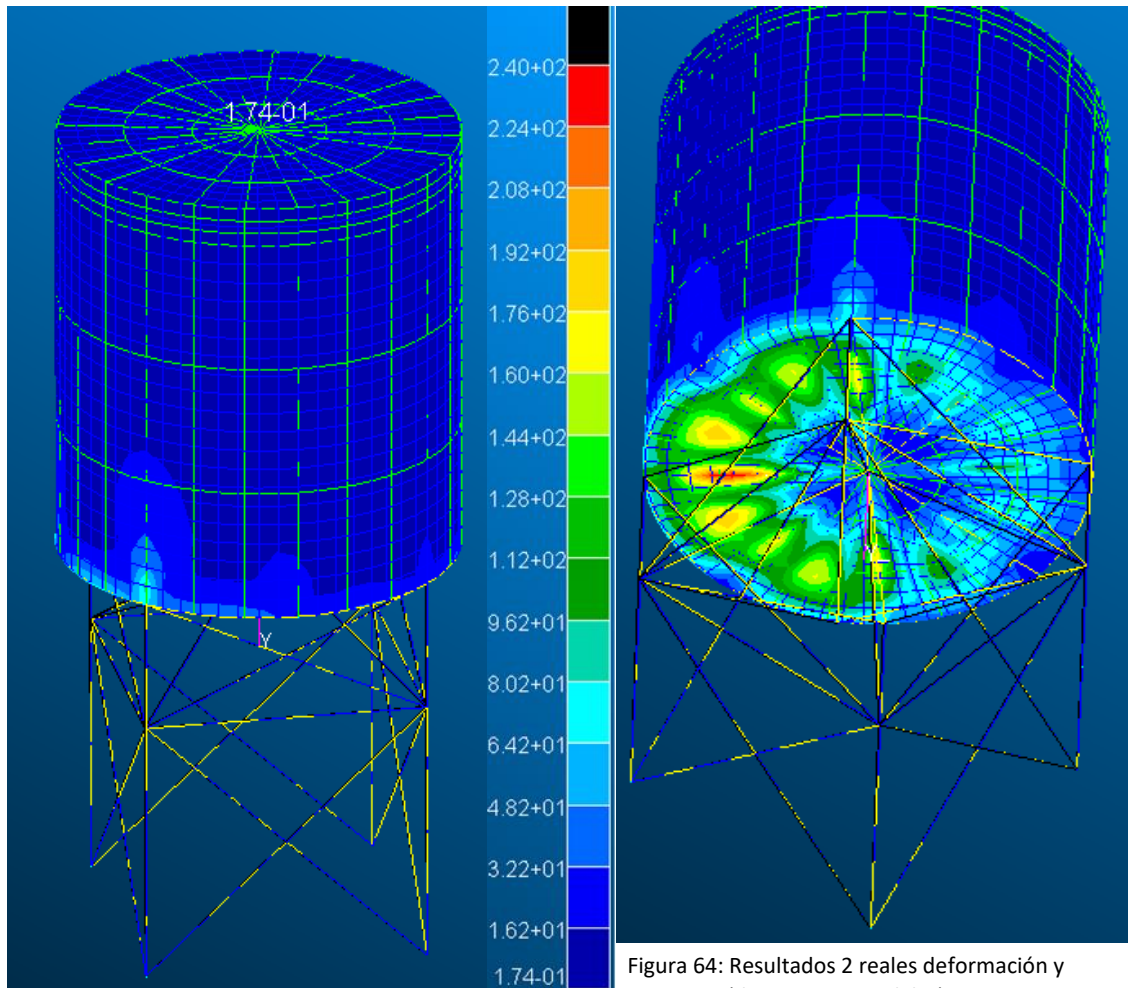


Figura 63: Resultados 1 reales deformación y tensiones (direcciones paralelas)

Figura 64: Resultados 2 reales deformación y tensiones (direcciones paralelas)

Como se puede observar en la primera imagen se muestra los resultados a través del *STRESS TENSOR* del depósito siendo $\sigma_{MAX}=240$ Mpa y $\sigma_{MIN}=0.174$ Mpa

A la hora de obtener los resultados se va a considerar un coeficiente de seguridad de 1.3. Como se observa, el punto crítico está en la base entre la chapa y la viga IPN-120, por lo que se va a calcular si se cumple el coeficiente de seguridad establecido.

La chapa tendrá un coeficiente de seguridad:

$$c.s. = \frac{\sigma_y}{\sigma_{MAX}} = \frac{310}{240} = 1.29 \quad 1.29 \geq 1.3$$

Vigas de perfil IPN-120, su coeficiente de seguridad será:

$$c.s. = \frac{\sigma_y}{\sigma_{MAX}} = \frac{355}{240} = 1.47 \quad 1.47 \geq 1.3$$

Respecto al perfil de la viga y la chapa, se ajusta perfectamente y cumple con el coeficiente de seguridad calculados en la simulación de elementos 1D y elementos 2D.

Aplicación viento y sismo opuestos más hidrostática y nieve.

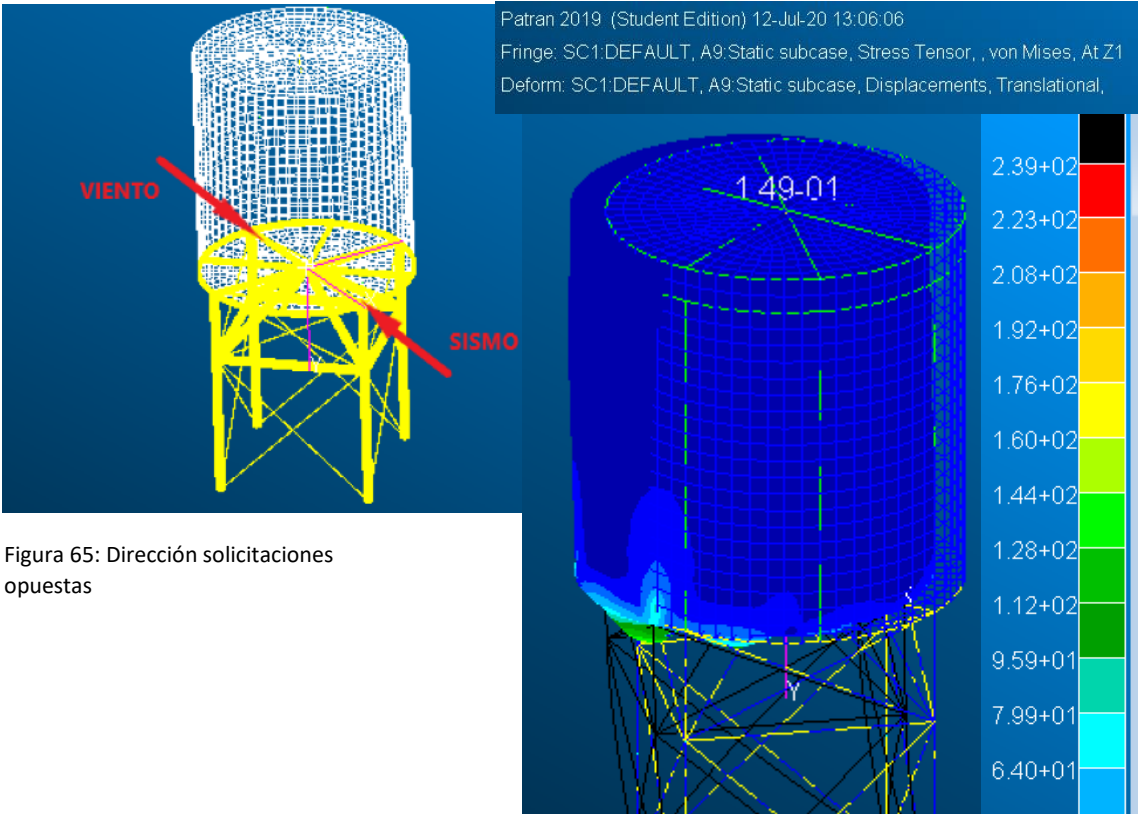


Figura 65: Dirección solicitaciones opuestas

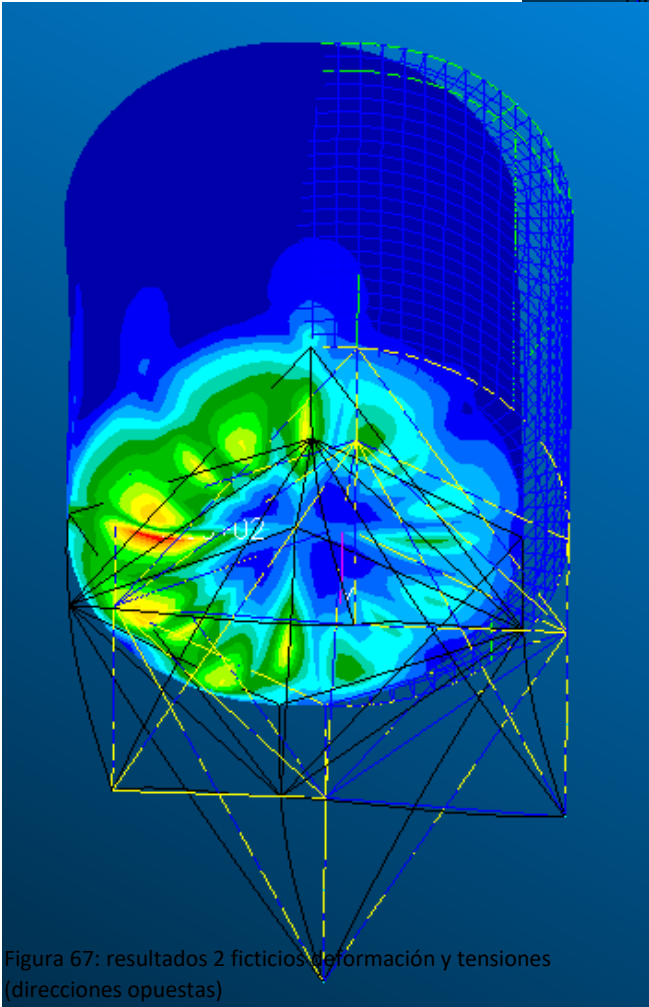


Figura 66: resultados 1 ficticios deformación y tensiones (direcciones opuestas)

Resultados a escala ficticia, *Stress tensor, Displacements, Translational*

Figura 67: resultados 2 ficticios deformación y tensiones (direcciones opuestas)

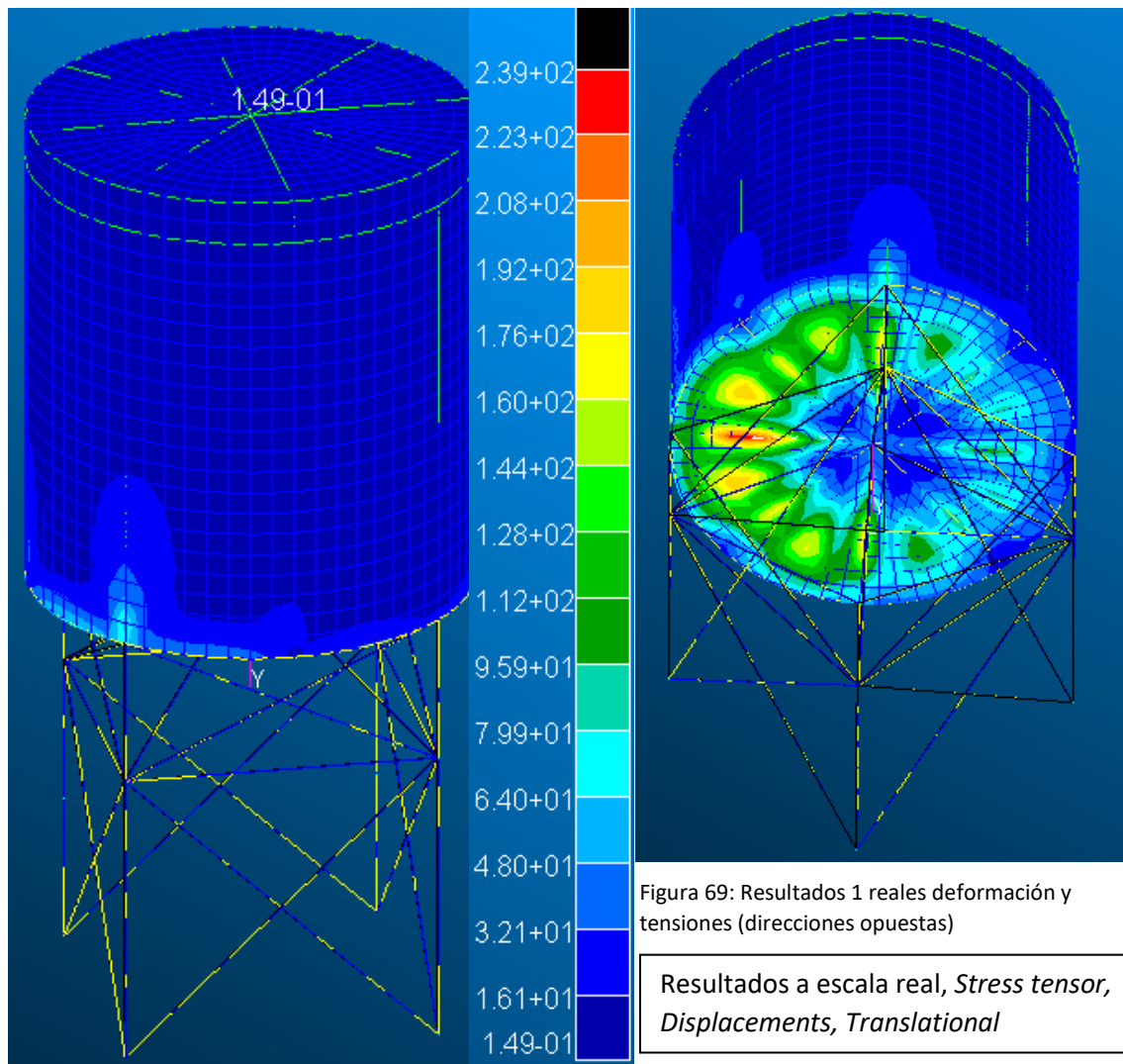


Figura 68: Resultados 2 reales deformación y tensiones (direcciones opuestas)

Como se puede observar en la imagen se muestra los resultados a través del *STRESS TENSOR* del depósito siendo $\sigma_{MAX}=239$ Mpa y $\sigma_{MIN}=0.149$ Mpa

A la hora de obtener los resultados se va a considerar un coeficiente de seguridad de 1.3. Como se observa, el punto crítico está en la base entre la chapa y la viga IPN-120, por lo que se va a calcular si se cumple el coeficiente de seguridad establecido.

La chapa tendrá un coeficiente de seguridad:

$$c.s. = \frac{\sigma_y}{\sigma_{MAX}} = \frac{310}{239} = 1.297 \quad 1.297 \geq 1.3$$

Vigas de perfil IPN-120, su coeficiente de seguridad será:

$$c.s. = \frac{\sigma_y}{\sigma_{MAX}} = \frac{355}{239} = 1.485 \quad 1.485 \geq 1.3$$

Respecto al perfil de la viga y la chapa, se ajusta perfectamente y cumple con el coeficiente de seguridad calculado en la simulación de elementos 1D y elementos 2D.

Aplicación viento y sismo 90 grados más hidrostática y nieve.

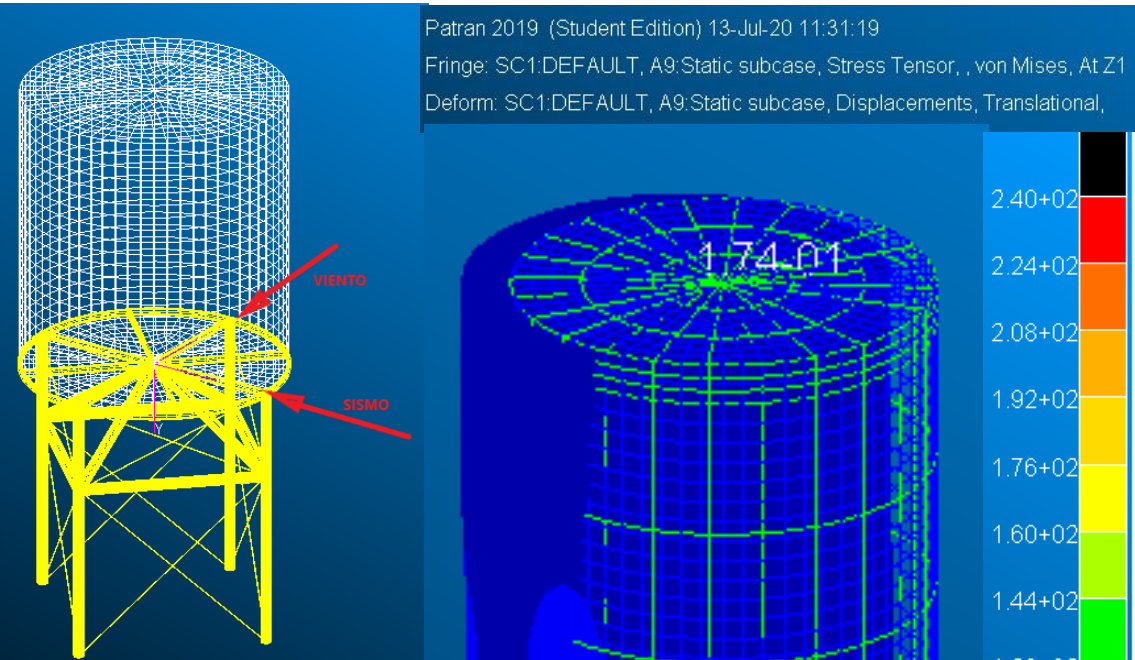


Figura 70: Dirección solicitaciones perpendiculares

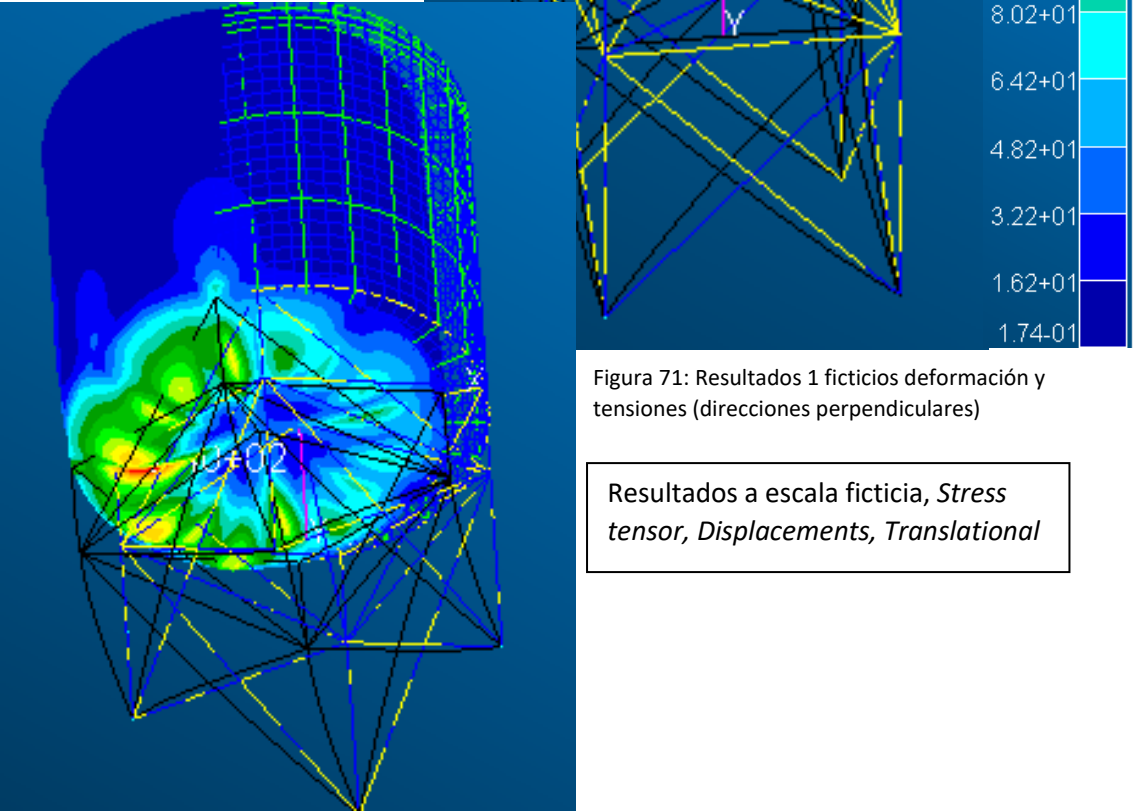


Figura 71: Resultados 1 ficticios deformación y tensiones (direcciones perpendiculares)

Resultados a escala ficticia, *Stress tensor, Displacements, Translational*

Figura 72: Resultados 2 ficticios deformación y tensiones (direcciones perpendiculares)

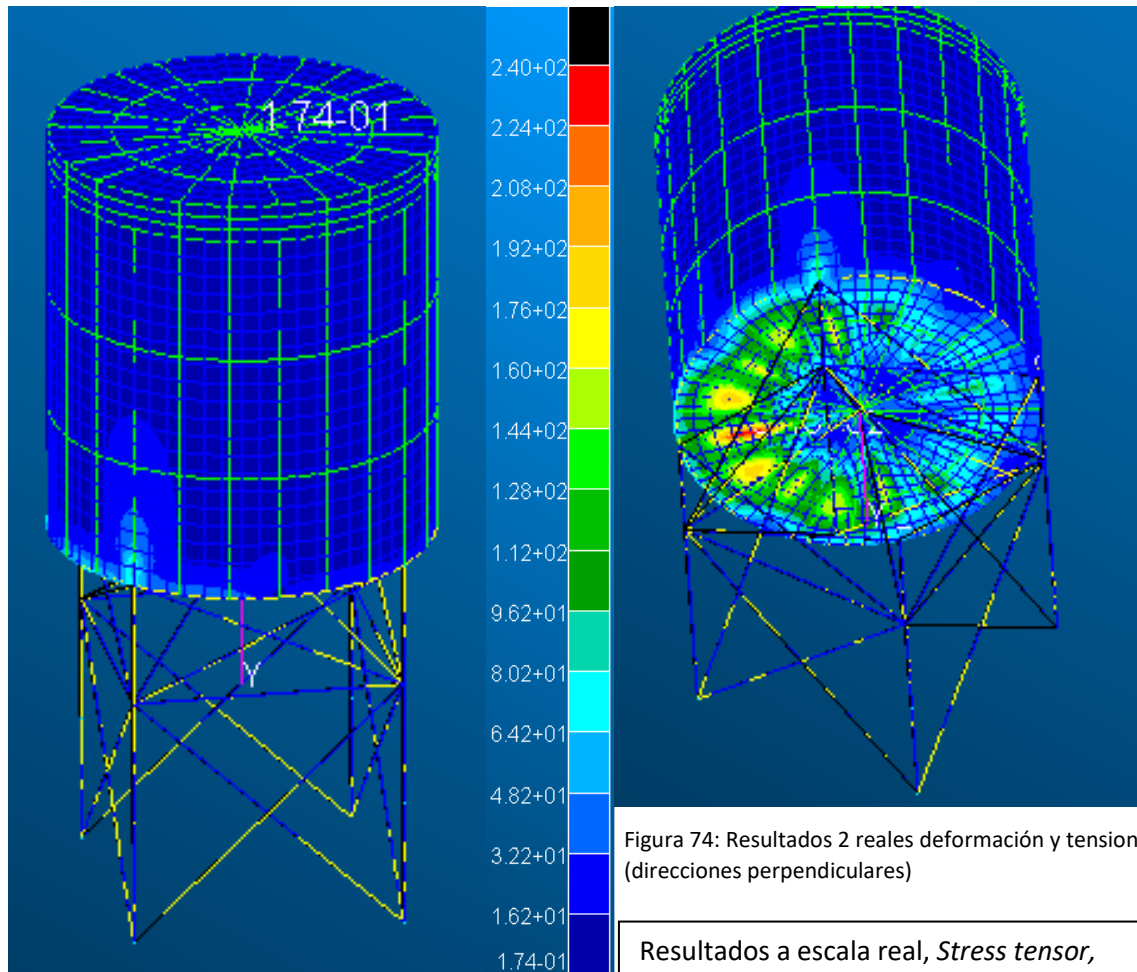


Figura 73: Resultados 1 reales deformación y tensiones (direcciones perpendiculares)

Figura 74: Resultados 2 reales deformación y tensiones (direcciones perpendiculares)

Resultados a escala real, *Stress tensor, Displacements, Translational*

En la primera imagen se muestra los resultados a través del *STRESS TENSOR* del depósito siendo $\sigma_{MAX}=240$ Mpa y $\sigma_{MIN}=0.174$ Mpa

A la hora de obtener los resultados se va a considerar un coeficiente de seguridad de 1.3. Como se observa, el punto crítico está en la base entre la chapa y la viga IPN-120, por lo que se va a calcular si se cumple el coeficiente de seguridad establecido.

La chapa tendrá un coeficiente de seguridad:

$$c. s. = \frac{\sigma_y}{\sigma_{MAX}} = \frac{310}{240} = 1.29 \quad 1.29 \geq 1.3$$

Vigas de perfil IPN-120, su coeficiente de seguridad será:

$$c. s. = \frac{\sigma_y}{\sigma_{MAX}} = \frac{355}{240} = 1.47 \quad 1.47 \geq 1.3$$

Respecto al perfil de la viga y la chapa, se ajusta perfectamente y cumple con el coeficiente de seguridad calculados en la simulación de elementos 1D y elementos 2D.

5 PLANOS



Figura 75: Depósito representado en Inventor

A la hora de generar los planos del depósito diseñado, se ha utilizado el software *Autodesk Inventor Professional*. El tipo de archivo que se ha creado ha sido un ensamblaje, por lo que se ha creado cada una de las piezas con sus dimensiones correspondientes y una vez hecho esto, han sido ensambladas con las restricciones correspondientes con el objetivo de crear una vista de explosión para un entendimiento más sencillo.

Por otra parte, se ha pintado de color negro opaco las partes que conforman los perfiles y tirante que forman la estructura y de color acero inoxidable la parte del depósito.

Una vez creado el ensamblaje, se procede a la creación de los planos.



Figura 76: Depósito en vista de explosión

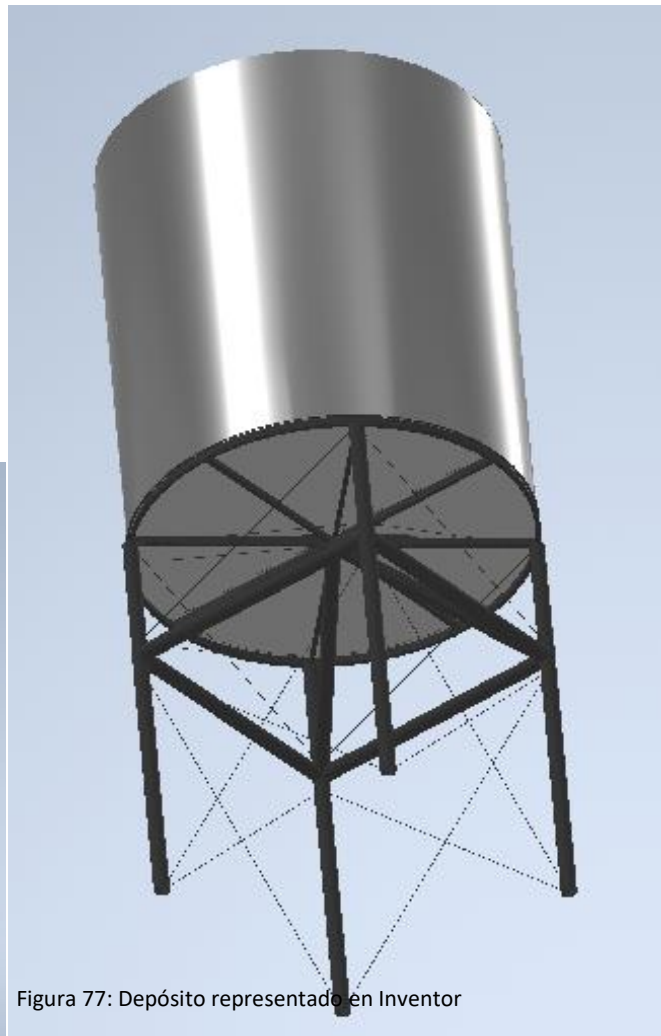


Figura 77: Depósito representado en Inventor

Alzado

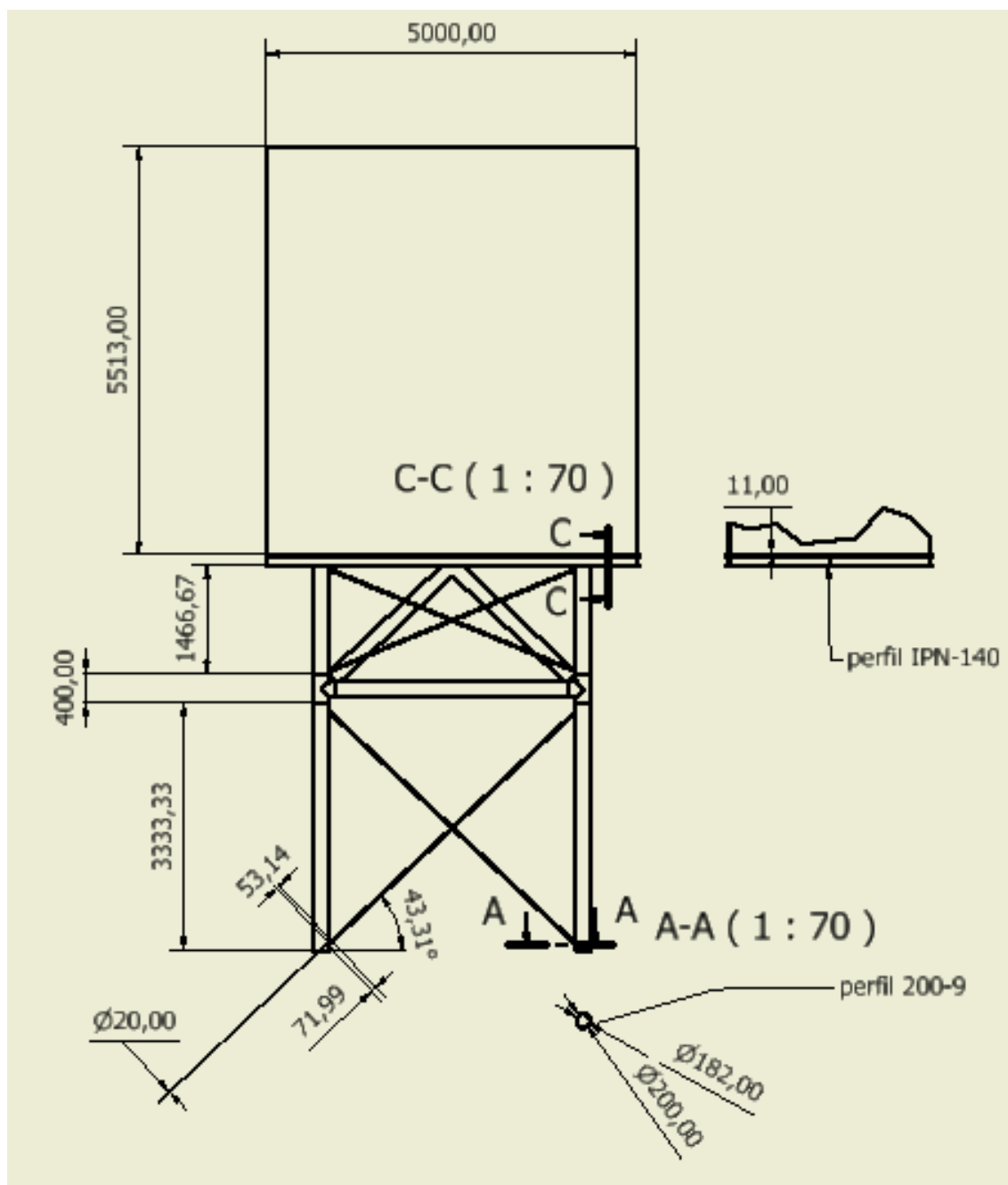


Figura 79: Alzado

Perfil izq.

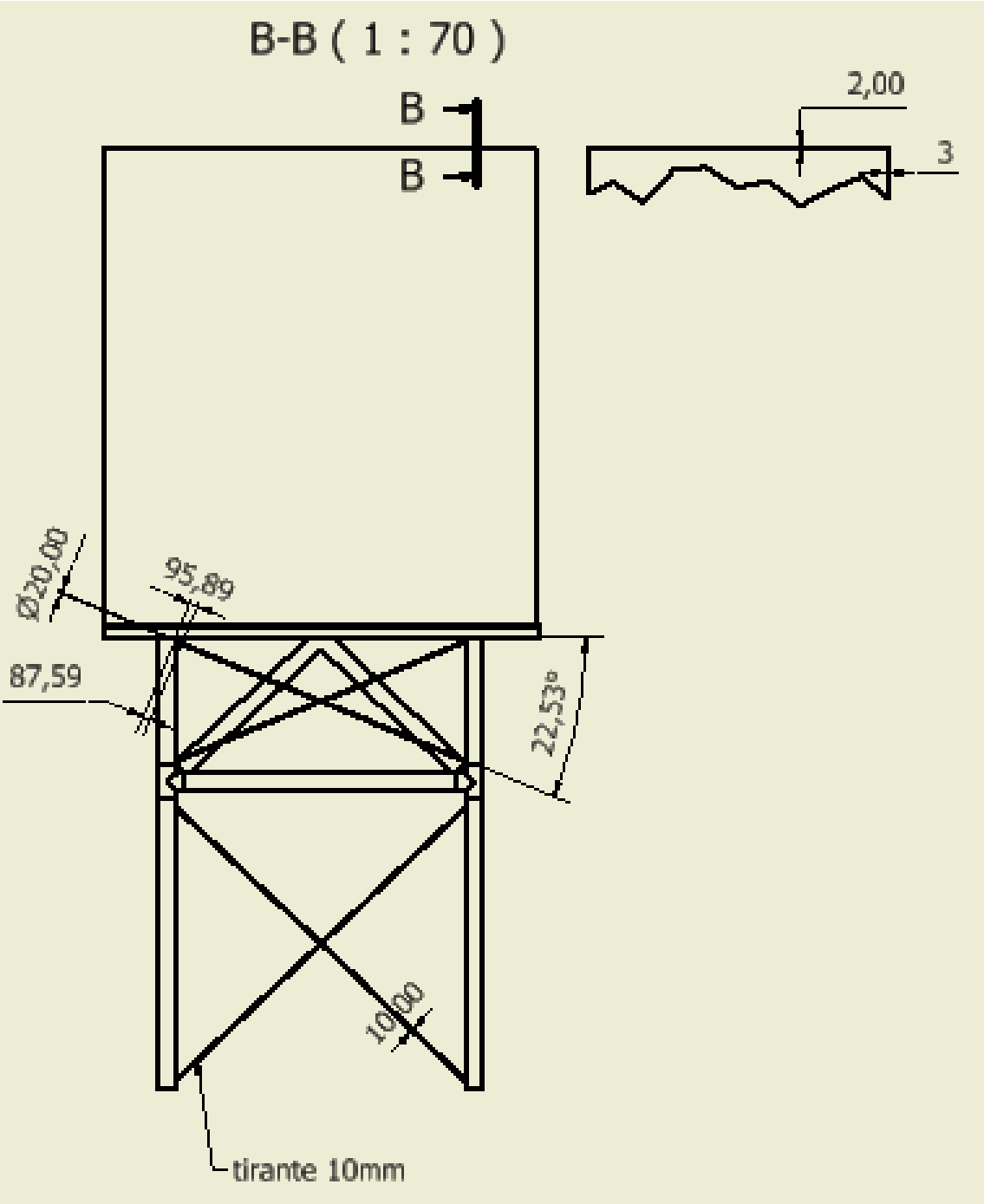


Figura 80: Perfil

Planta

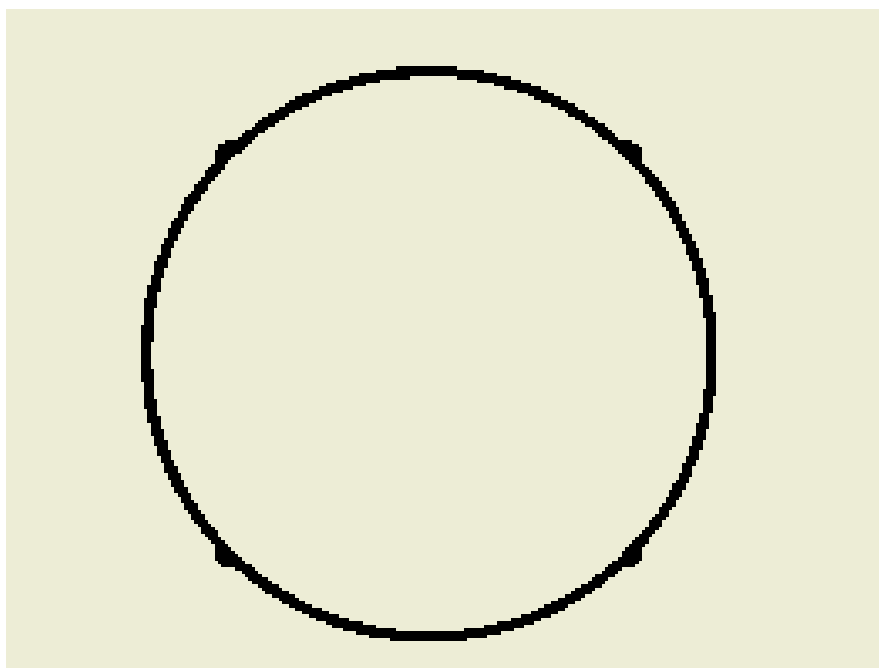


Figura 81: Planta

6 AISLAMIENTO TÉRMICO

El depósito se debe de recubrir de paneles aislante cuya función es la de evitar flujos de calor entrantes o saliente con el objetivo de mantener el líquido del interior a una temperatura constante para acceder a consumir el agua en perfectas condiciones. El aislamiento implica un ahorro de energía en el mantenimiento del proceso de equilibrio térmico, que conlleva ahorro de costes y tiempos de vida más largos.

En **León**, durante el transcurso del año, la **temperatura** generalmente varía de 0 °C a 27 °C y rara vez baja a menos de -4 °C o sube a más de 32 °C. Por otro lado, el **agua** mineral de consumo debe de estar a **temperatura** ambiente, que normalmente está fresca a unos 20-25 °C.

Una vez vistas las temperaturas a las que estará sometido el depósito y a las que se quiere mantener el agua potable, se puede empezar a calcular el espesor del aislante.

Es muy importante elegir el salto térmico más grande ya que será ahí cuando se necesite más aislante. Por ello, las temperaturas tanto interiores y exteriores elegidas han sido: $T_{int} = 25^{\circ}\text{C}$ y $T_{ext} = -4^{\circ}\text{C}$.

Una vez obtenidas, es necesaria la conductividad térmica de los materiales que va a ser utilizada. En primer lugar, se obtienen los datos del acero inoxidable que ha proporcionado el fabricante en dicha tabla.

Specific Heat	490	530	J/kg.K	0.379191	0.410145	BTU/lb.F
Thermal Conductivity	14	17	W/m.K	26.2085	31.8246	BTU.ft/h.ft².F
Thermal Expansion	16	18	10 ⁻⁶ /K	28.8	32.4	10 ⁻⁶ /°F

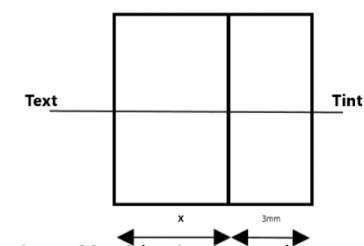
El material aislante que se va a utilizar debido a su precio y a su capacidad aislante es la lana mineral que tiene una conductividad térmica de 0.04 w/m.k

$$q \left(\frac{W}{m^2} \right) = \frac{T_{int} - T_{ext}}{R_{total}}$$

Conductividad térmica pared sin aislante:

$$q \left(\frac{W}{m^2} \right) = \frac{25 - (-4)}{\frac{0.003}{17}} = 164333.33 \frac{W}{m^2}$$

Obtenido todos los datos necesarios se procede al cálculo de espesores.



PARED LATERAL

$$q \left(\frac{W}{m^2} \right) = \frac{25 - (-4)}{\frac{0.003}{17} + \frac{0.015}{0.04}} = 77,29 \frac{W}{m^2}$$

Por lo tanto, si se considera un espesor de 1,5cm de lana mineral, las pérdidas térmicas se reducirían enormemente.

$$Reduccion_perdidas_termicas\% = \frac{164333.33 - 77.29}{164333.33} 100 = 99.95\%$$

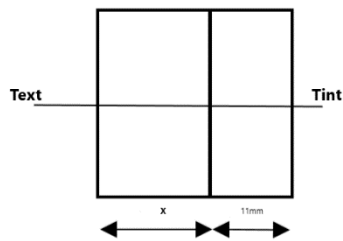


Figura 83: Aislamiento base

BASE

$$q \left(\frac{W}{m^2} \right) = \frac{25 - (-4)}{\frac{0.011}{17} + \frac{0.015}{0.04}} = 77,2 \frac{W}{m^2}$$

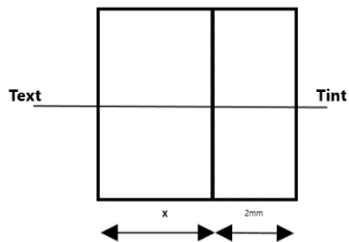


Figura 84: Aislamiento techo

TECHO

$$q \left(\frac{W}{m^2} \right) = \frac{25 - (-4)}{\frac{0.002}{17} + \frac{0.015}{0.04}} = 77,3 \frac{W}{m^2}$$

Mientras tanto, las pérdidas térmicas tanto en el techo como en la base no difieren mucho de las pérdidas en la pared lateral, ya que debido a la pequeña diferencia de medidas se pueden considerar como resultados análogos.

7 PLIEGO DE CONDICIONES TECNICAS

A la hora de ejecutar la construcción del depósito son varias las condiciones necesarias para la correcta ejecución de cada fase y el uso final del mismo sin dañar la estructura o que esta colapse.

El principio es fundamental para asegurar que se garantice una correcta técnica de soldadura para el acero inoxidable con la finalidad de que este no pierda sus propiedades. Para ello, se empleará la soldadura TIG (*Tungsten Inert Gas*) cuyos principales beneficios que se buscan:

1. No suele generar escorias en el cordón.
2. Este proceso puede ser empleado en cualquier posición de la soldadura.
3. Este tipo de soldadura no genera ninguna salpicadura alrededor del cordón.
4. No afecta a la composición química ni a propiedades del metal base.

Por otra parte, también hay que tener cuidado a la hora de la corrosión galvánica ya que el depósito es de acero inoxidable y la estructura, de acero. Por ello, para evitar este proceso, se deberá asegurar que haya una separación entre piezas.

Para que se produzca corrosión galvánica, o por contacto, debe haber:

1. Diferentes potenciales de corrosión de los metales dentro de un sistema.
2. Unión física entre los dos metales.
3. Una película de humedad eléctrica- mente conductora (electrolito) que conecte ambos metales.

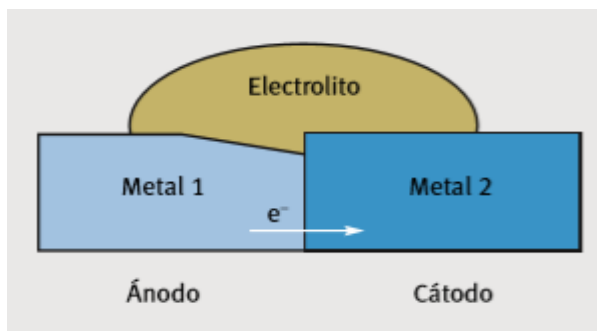


Figura 85: Principio corrosión galvánica



Figura 86: Corrosión galvánica

Si se produce la corrosión galvánica, el material que sea menos noble, en este caso el ánodo, se vería atacado preferentemente mientras que el material más noble, que sería el cátodo, se ve incluso protegido contra la corrosión. De hecho, el principio de la protección catódica se basa en ánodos de sacrificio que proporcionan protección contra la corrosión.

También, se deberá asegurar un programa de inspecciones periódicas una vez construido el depósito para observar defectos de oxidación, falla, limpieza... y, puesto que se va a utilizar para consumo humano, deberá cumplir con las restricciones sanitarias correspondientes.

La limpieza y vaciado del depósito se deberá hacer periódicamente para inspeccionar su interior y asegurar que no hay ninguna falla interna.

8 PRESUPUESTO

El presupuesto consiste en un análisis basado en una valoración económica sobre el proyecto, considerando diversos factores interrelacionados como:

- ❖ Horas trabajadas por el alumno.
- ❖ Horas supervisión del profesor.
- ❖ Licencia Matlab.
- ❖ Licencia *MSC Nastran and Patran*.
- ❖ Licencia Microsoft.
- ❖ Licencia *Autodesk Inventor Professional*.

Al ser un estudiante, las licencias utilizadas para el diseño y comprobación del mismo han sido gratuitas. No obstante, de no haber dispuesto de ellas, el precio se dispararía. Por otra parte, la electricidad consumida por el ordenador que debería de ser una amortización no se ha tenido en cuenta; sin embargo, esto no sería un gasto muy grande e iría interrelacionado con las horas de trabajo invertidas. Por último, los dos puntos que determinarán el coste del trabajo realizado serán las horas trabajadas por el alumno y las horas de supervisión el profesor. Claro está que hay que añadirles el impuesto de valor agregado (IVA) que consiste en integrar un 21% del subtotal de los servicios y productos adquiridos por el comprador.

Caso de resultar licencias gratuitas

conceptos	UNIDADES	PRECIO UNITARIO	COSTE(euros)
Horas trabajo alumno	400	12.5	5000
Horas supervision profesor	20	35	700
Licencia matlab	1	0	0
Licencia MSC Nastran and Patran	1	0	0
Licencia Microsoft	1	0	0
Licencia autodek Inventor Professional	1	0	0
Subtotal			5700
IVA		21%	1197
TOTAL+IVA			6897

Tabla 21: Presupuesto sin incluir licencias

Caso de no resultar licencias gratuitas

conceptos	UNIDADES	PRECIO UNITARIO	COSTE(euros)
Horas trabajo alumno	400	12.5	5000
Horas supervision profesor	20	35	700
Licencia matlab	1	800	800
Licencia MSC Nastran and Patran	1	1500	1500
Licencia Microsoft	1	70	70
Licencia autodek Inventor Professional	1	2700	2700
Subtotal			10770
IVA		21%	2261.7
TOTAL+IVA			13031.7

Tabla 22: Presupuesto incluyendo licencias

9 BIBLIOGRAFÍA

1. Guía técnica diseño y cálculo del aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos (IDA)
2. serie materiales y sus aplicaciones, Volumen10, El acero inoxidable en contacto con otros materiales metálicos (euro inox, the european stainless Steel development association)
3. Patran 2010 PCL and customization, MSC software
4. GSDMA GUIDELINES for SEISMIC DESIGN OF LIQUID STORAGE TANKS Provisions with Commentary and Explanatory Examples
5. une-en-1991-1-4-norma-espanola-de-viento
6. AEAS. 1990. Recomendaciones sobre depositos de agua potable
7. IITK-GSDMA. "Guidelines for Seismic Design of Liquid Storage Tanks. NICEE (2007).
8. VELETOS, A.S. "Seismic response and design of liquid storage tanks". Guidelines for seismic design of oil and pipelines system". ASCE (1984).
9. Eurocode 8. "Design provisions of earthquake resistance of structures, Part 4 = Silos, tanks and pipelines". European Committee for Standardization.
10. HOUSNER , G.W. "The dynamic behavior of water tanks". Bulletin of the Seismological Society of America. Vol 53(1963).
11. HAROUN M.A. and HOUSNER, G.W. "Seismic design of liquid storage tanks". Journal of Technical Councils. ASCE (1981).
12. IITK-GSDMA. "Guidelines for Seismic Design of Liquid Storage Tanks. NICEE (2007).
13. NCSE-02. "Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y Edificación". Ministerio de Fomento.
14. SE-A Seguridad Estructural Acero
15. MALHOTRA, P.K. "Simple procedure for seismic analysis of liquid storage tanks. Structural Engineering. Vol 10 (2000).
16. "wind loads on circular storage bins, silos and Tanks: I. point pressure measurements on isolated structures" P.A.Macdonald, H..C.S.Kwok, J.D. Holmes.

10 GLOSARIO, UNIDADES Y RESULTADOS

SIMBOLO	UNIDAD	DEFINICION	MODO OBTENCION	VALOR
D o d	m	Diámetro nominal del tanque	Dato partida	5m
h	m	Altura nominal del tanque	Dato partida	5m
ρ (Agua)	Kg/m^3	Densidad del líquido tanque	Dato partida	1000 Kg/m^3
g	m/s^2	Aceleración gravedad	Dato partida	9.81 m/s^2
ρ (Acero Inox)	Kg/m^3	Densidad acero inoxidable	Dato partida	7960 Kg/m^3
σ_y (Acero Inox)	Mpa	Límite elástico acero inoxidable	Dato partida	310Mpa
ν (Acero Inox)	adimensional	Coeficiente de Poisson	Dato partida	0.27
ρ (Perfil I)	Kg/m^3	Densidad perfil IPN-140	Dato partida	7850 Kg/m^3
σ_y (Perfil I)	Mpa	Límite elástico perfil IPN-140	Dato Partida	355Mpa
ν (Perfil I))	adimensional	Coeficiente de Poisson perfil IPN-140	Dato partida	0.3
ρ (Perfil O)	Kg/m^3	Densidad perfil 200-9	Dato partida	7850 Kg/m^3
σ_y (Perfil O)	Mpa	Coeficiente de Poisson perfil 200-9	Dato partida	275Mpa
ν (Perfil O))	adimensional	Densidad perfil 200-9	Dato partida	0.3
ρ (tirante)	Kg/m^3	Densidad tirante	Dato partida	7850 Kg/m^3
σ_y (tirante)	Mpa	Coeficiente de Poisson tirante	Dato partida	375
ν (tirante)	adimensional	Densidad tirante	Dato partida	0.29

DISEÑO Y ANALISIS ESTRUCTURAL (FEM) DE DEPOSITO ELEVADO DE AGUA

V	m^3	Volumen del depósito neto	$V = \frac{\pi}{4} * \varnothing^2 * h$	$100m^3$
v	Km/h	Velocidad del viento	Dato partida	92.88Km/h
z_0	adimensional	Rugosidad del terreno de la zona	Tabla	0.05
k_r	adimensional	Factor del terreno	$k_r = 0.19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0.07}$	0.19
$c_r(z)$	adimensional	Factor de rugosidad	$c_r(z) = k_r \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$	$0.19 \ln \left(\frac{z}{0.05} \right)$
$v_m(z)$	m/s	Velocidad media	$v_m(z) = c_r(z) c_0(z) v_b$	$4.902 \ln \left(\frac{z}{0.05} \right)$
$c_0(z)$	adimensional	Coeficiente topográfico	Dato	1
$I_v(z)$	adimensional	Intensidad de la turbulencia	$I_v(z) = \frac{k_1}{c_0(z) * \ln(z/z_0)}$	$\frac{1}{1 * \ln(z/0.05)}$
k_1	adimensional	Factor de turbulencia	Dato	1
$q_p(z)$	Pa	Presión correspondiente a la velocidad de pico	$q_p(z) = [1 + 7I_v(z)] \frac{1}{2} * \rho * v_m^2(z)$	Sustituida dependiente de z
ρ (aire)	kg/m^3	Densidad del aire	Dato de partida	$1.25kg/m^3$
$\psi_{\lambda\alpha}$	adimensional	Factor de efecto de cola	Formula dependiente del ángulo	1
ϕ	adimensional	Relación solidez	$\phi = \frac{A}{A_c}$	0.159
Re	adimensional	Reinols	$Re = \frac{b * v(z_e)}{v}$	10^7
b	m	Diámetro	Dato de partida	5
v	m^2/s	Velocidad cinemática	Dato	$15 * 10^{-6}$
$v(z_e)$	m/s	Velocidad de pico del viento		
λ	adimensional	Esbeltez efectiva	Dato tabla	70
α	grados	Ángulo		
α_{min}	grados	Ángulo presión mínima		
α_A	grados	Ángulo en el que se		

		separa el flujo		
$c_{p,0}$	adimensional	Coeficiente de presión	$-0.5+0.4*\cos(\alpha)+0.8*\cos(2*\alpha)+0.3*\cos(3*\alpha)-0.1*\cos(4*\alpha)-0.05*\cos(5*\alpha)$	
c_{pe}	adimensional	Coeficiente de presión externa	$c_{pe} = c_{p,0} * \psi_{\lambda\alpha}$	$c_{pe} = c_{p,0}$
w_e	Pa	Presión del viento en superficie exterior	$w_e = q_p(z_e)c_{pe}$	
$q_p(z)$	adimensional	Coeficiente de altura	$q_p(z) = \left[1 + 7 \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{0.05}\right)}\right]^{\frac{1}{2}} * 1.25 * (4.902 * \ln\left(\frac{z}{0.05}\right))^2$	
mc	kg	Masa convectiva		
hc	m	Altura centro de presión convectivo pared		
kc	N/m	Constante de muelle convectivo		
mi	kg	Masa impulsiva		
hi	m	Altura centro de presión impulsivo pared		
m	kg	Masa		
w	Hz	Frecuencia	$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$	
T	s	Periodo	$T = \frac{2\pi}{w}$	
T_i	s	Periodo impulsivo	Caso de depósito cilíndrico $T_i = 2\pi \sqrt{\frac{m_i + m_s}{K_s}}$	0.245s
T_c	s	Periodo convectivo	Caso de depósito cilíndrico $T_c = C_c \sqrt{\frac{D}{g}}$	2.498s

DISEÑO Y ANALISIS ESTRUCTURAL (FEM) DE DEPOSITO ELEVADO DE AGUA

C_c	adimensional	Coeficiente convectivo	Dato	3.5
m_s	Kn		m_s = masa de recipiente vacío + un tercio de la masa de andamiage	46.8Kn
k_s	N/m	Rigidez lateral	Dato que se saca	$K_s = \frac{10Kn}{0,18 * 10^{-3}m}$
Z	adimensional	Factor de Zona IV sísmico	Dato tabla	0.24
R	adimensional	Factor de reducción de respuesta	Dato tabla	2,5
I	adimensional	Tipo de tanque de almacenamiento de líquido	Dato tabla	1,5
$(\frac{S_a}{g})_i$	adimensional			2,5
$(A_h)_i$	adimensional	Coeficiente horizontal para el modo impulsivo	$(A_h)_i = \frac{Z}{2} \frac{I}{R} (\frac{S_a}{g})_i$	0.18
$(\frac{S_a}{g})_c$	adimensional			
$(A_h)_c$	adimensional	Coeficiente horizontal para el modo impulsivo	$(A_h)_c = \frac{Z}{2} \frac{I}{R} (\frac{S_a}{g})_c$	0.08
V	Kn	Cortante	$V = \sqrt{V_i^2 + V_c^2}$	150Kn
V_i	Kn	Cortante en base modo impulsivo tanque elevado	$V_i = (A_h)_i (m_i + m_s)g$	148.2Kn
V_c	Kn	Cortante en base modo convectivo tanque elevado	$V_c = (A_h)_c (m_c)g$	17.6Kn
h_i^*	m	Altura centro de presión pared y base modo impulsivo		3.095m

h_c^*	m	Altura centro de presión pared y base modo convectivo		3.775m
Cdg	m	Altura centro de gravedad desde la base del depósito	$cdg = \frac{\sum P * d}{\sum P}$	1,6m
h_{cd}	m	Altura centro de gravedad desde el suelo	$h_{cd} = h + cdg$	6.6m
M_i^*	Knm	Momento de vuelco en la base modo impulsivo	$M_i^* = (A_h)_i [m_i (h_i^* + h_s) + m_s h_{cg}] g$	1186Knm
M_c^*	Knm	Momento de vuelco en la base modo convectivo	$M_c^* = (A_h)_c [m_c (h_c^* + h_s)] g$	154.8Knm
M	Knm	Momento de vuelco total	$M = \sqrt{(M_i^*)^2 + (M_c^*)^2}$	1196Knm
$Q_{iw(y)}$	adimensional	Coeficiente de presión hidrodinámica impulsiva en pared	$Q_{iw(y)} = 0.866 [1 - (\frac{y}{h})^2] * \tanh(0.866 \frac{D}{h})$	
$P_{iw(y)}$	Pa	Presión hidrodinámica impulsiva en pared	$P_{iw(y)} = Q_{iw(y)} * (A_h)_i * \rho g h * \cos(\varphi)$	
P_{ib}	Pa	Presión hidrodinámica impulsiva en base	$P_{ib} = 0.866 (A_h)_i * \rho g h \frac{\sinh(1.732 \frac{x}{h})}{\cosh(0.866 \frac{l'}{h})}$	

DISEÑO Y ANALISIS ESTRUCTURAL (FEM) DE DEPOSITO ELEVADO DE AGUA

φ	grados	Ángulo respecto al centro de la base del depósito	De 0 a 360 grados	
l'	m	Longitud entre puntos cortantes en la circunferencia de la base		5m
$Q_{cw(y)} =$	adimensional	Coeficiente de presión hidrodinámica convectiva en pared	$Q_{cw(y)} = 0.5625 \frac{\cosh(3.674 \frac{y}{D})}{\cosh(3.674 \frac{h}{D})}$	Varia en y
P_{cw}	Pa	Presión hidrodinámica convectiva en pared	$P_{cw} = Q_{cw(y)} * (A_h)_c * \rho g h * [1 - \frac{1}{3} \cos^2(\varphi)] \cos(\varphi)$	Varia en y
$Q_{cb(x)} =$	adimensional	Coeficiente de presión hidrodinámica convectiva en base	$Q_{cb(x)} = 1.125 [\frac{x}{D} - \frac{4}{3} (\frac{x}{D})^3] * \sinh(3.674 \frac{h}{D})$	Varia en x
P_{cb}	Pa	Presión hidrodinámica convectiva en base	$P_{cb} = Q_{cb(x)} * (A_h)_c * \rho g D$	Varia en x
P_{ww}	Pa	Presión debido a la inercia de la pared	$P_{ww} = (A_h)_i * t * \rho_m * g$	42.39Pa
P_v	Pa	Presión debida a la excitación vertical	$P_v = (A_v) [\rho g h (1 - \frac{y}{h})]$	
P	Pa	Presión total	$P = \sqrt{(P_{iw} + P_{ww})^2 + P_{cw}^2 + P_v^2}$	
P_b	Pa	Presión total	$P_b = \sqrt{(P_{iw} + P_{ww})^2 + P_{cw}^2 + P_v^2}$	5389.9Pa

		máxima base		
Pp	Pa	Presión total máxima pared	$Pp = \sqrt{(P_{iw} + P_{ww})^2 + P_{cw}^2 + P_v^2}$	49050Pa
<i>Diferencia_din_est</i>	%	Diferencia entre presión hidrodinámica y presión hidrostática	$\text{Diferencia_din_est_}\% = \left(1 - \frac{49050 - 5389,9}{49050}\right) * 100$	10,98%
d_{max}	m	Altura de ola generada por el sismo	$d_{max} = (A_h)_c * R * \frac{D}{2}$	
T_i	s	Periodo de tiempos tanque vacío	$T_i = 2\pi \sqrt{\frac{m_s}{K_s}}$	0.057s
$(A_h)_i$	adimensional	Coefficiente horizontal de sismo tanque vacío	$(A_h)_i = \frac{Z}{2R} \left(\frac{S_a}{g}\right)_i$	0.18
V_i	Kn	Cortante en base tanque vacío	$V_i = (A_h)_i(m_s)g$	8,2Kn
M^*	Knm	Momento en base tanque vacío	$M^* = (A_h)_i[m_s h_{cg}]g$	54.53Knm
q	$\frac{W}{m^2}$	Conductividad térmica	$q = \frac{T_{int} - T_{ext}}{R_{total}}$	
T_{int}	K°	Temperatura interior		

DISEÑO Y ANALISIS ESTRUCTURAL (FEM) DE DEPOSITO ELEVADO DE AGUA

T_{ext}	K°	Temperatur a externa		
R_{total}	Resistencia térmica	Resistencia térmica		

11 ÍNDICES

11.1 ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de las afueras de León

Figura 2: Mapa de altitudes afueras de León

Figura 3: Disposición optima de depósito

Figura 4: Mapa hidrogeográfico de las afueras de León

Figura 5: Categorías de zonas según color para el mapa hidrogeológico

Figura 6: Mapa hidrogeológico de España

Figura 7: Gráfico crecimiento población Trobajo del Cerecedo

Figura 8: Gráfico crecimiento población Onzonilla

Figura 9: Gráfico crecimiento población Santovenia de la Valduncina

Figura 10: Fallo depósito elevado con corrosión de las juntas

Figura 11: Fallo depósito elevado por presión del viento

Figura 12: Colapso depósito por presión del viento

Figura 13: Fallo de depósito por sismo

Figura 14: Fallo de la zapa del depósito

Figura 15: Esfuerzos en láminas

Figura 16: Descomposición de esfuerzos membranales

Figura 17: Esfuerzos membranales en una lámina

Figura 18: Sección de una lámina según el plano xz

Figura 19: Modelado del depósito 3d con elementos “*beam*” y “*surface*”

Figura 20: Modelado mallado de elementos “*shell*” y “*beam*”

Figura 21: Modelado recipiente con elementos “*shell*”

Figura 22: Nodos del mallado

Figura 23: Elementos “*beam*” representados

Figura 24: Nodos con restricción de movimiento

Figura 25: Vectores presión hidroestática sobre pared

Figura 26: Gráfico velocidades máximas y mínimas del viento

Figura 27: Relación coeficiente de presión ángulo

Figura 28: Aproximación numérica utilizando la serie del coseno de Fourier

Figura 29: Distribución de presiones sobre cilindro aplicando la aproximación de Fourier

Figura 30: Relación velocidad altura respecto el suelo

Figura 31: Relación velocidad pico con altura respecto el depósito

Figura 32: Relación coeficiente de presión exterior con ángulo

Figura 33: Depósito respecto al sistema de referencia de coordenadas cilíndricas en el suelo

Figura 34: Distribución de presiones sobre la superficie generadas por la solicitación del viento

Figura 35: Relación presión superficie - ángulo – altura (0 a 360 grados)

Figura 36: Relación presión superficie - ángulo – altura (0 a 180 grados)

Figura 37: Modelo muelle masa de depósito bajo sismo

Figura 38: Distribución de presiones pared y base modo impulsivo y convectivo

Figura 39: Simplificación de la distribución de presiones pared modo impulsivo y convectivo

Figura 40: Modelo muelle masa de depósito elevado bajo sismo

Figura 41: Sistema de dos masas idealizado de taque elevado

Figura 42: Oscilación simple

Figura 43: Mapa sismo según los factores de zonas

Figura 44: Distribución de presiones modo impulsivo

Figura 45: Distribución de presiones modo convectivo

Figura 46: Representación de aplicación de variables

Figura 47: Distribución de presiones impulsivas en pared plano central

Figura 48: Distribución de presiones impulsivas en base plano central

Figura 49: Distribución de presiones convectivas en pared plano central

Figura 50: Distribución de presiones convectivas en base plano central

Figura 51: Altura de ola

Figura 52: Sistema de referencia de coordenadas cilíndricas base

Figura 53: Distribución de presiones modo impulsivo sobre pared y marcado de valores del plano central

Figura 54: Sistema de referencia de coordenadas cartesianas base

Figura 55: Distribución de presiones modo impulsivo sobre base y marcado de valores del plano central

Figura 56: Distribución de presiones modo convectivo sobre pared y marcado de valores del plano central

Figura 57: Distribución de presiones modo convectivo sobre base y marcado de valores del plano central

Figura 58: Distribución de presiones Pww

Figura 59: Distribución de presiones techo

Figura 60: Dirección solicitaciones paralelas

Figura 61: Resultados 1 ficticios deformación y tensiones (direcciones paralelas)

Figura 62: Resultados 2 ficticios deformación y tensiones (direcciones paralelas)

Figura 63: Resultados 1 reales deformación y tensiones (direcciones paralelas)

Figura 64: Resultados 2 reales deformación y tensiones (direcciones paralelas)

Figura 65: Dirección solicitaciones opuestas

Figura 66: Resultados 1 ficticios deformación y tensiones (direcciones opuestas)

Figura 67: Resultados 2 ficticios deformación y tensiones (direcciones opuestas)

Figura 68: Resultados 1 reales deformación y tensiones (direcciones opuestas)

Figura 69: Resultados 2 reales deformación y tensiones (direcciones opuestas)

Figura 70: Dirección solicitaciones perpendiculares

Figura 71: Resultados 1 ficticios deformación y tensiones (direcciones perpendiculares)

Figura 72: Resultados 2 ficticios deformación y tensiones (direcciones perpendiculares)

Figura 73: Resultados 1 reales deformación y tensiones (direcciones perpendiculares)

Figura 74: Resultados 2 reales deformación y tensiones (direcciones perpendiculares)

Figura 75: Depósito representado en Inventor

Figura 76: Depósito en vista de explosión

Figura 77: Depósito representado en Inventor

Figura 78: Planos depósito acotados y referenciados

Figura 79: Alzado

Figura 80: Perfil

Figura 81: Planta

Figura 82: Aislamiento pared

Figura 83: Aislamiento base

Figura 84: Aislamiento techo

Figura 85: Principio corrosión galvánica

Figura 86: Corrosión galvánica

11.2 ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades acero inoxidable

Tabla 2: Propiedades acero perfil IPN según el espesor nominal

Tabla 3: Propiedades acero perfil IPN

Tabla 4: 1 Medidas y datos de perfiles IPN

Tabla 5: 2 Medidas y datos de perfiles IPN

Tabla 6: Medidas y datos de perfiles tubulares S275

Tabla 7: Velocidad máxima y mínima viento en León

Tabla 8: Categorías de esbeltez efectiva

Tabla 9: Factor de cola en función de la relación de solidez

Tabla 10: Valores típicos para la distribución de presiones

Tabla 11: Expresiones para sacar los valores del modelo masa muelle

Tabla 12: Cálculo de pesos

Tabla 13: Cálculo de relaciones

Tabla 14: Relación h/d con coeficiente convectivo

Tabla 15: Factor de zona Z

Tabla 16: Tipo de tanque de almacenamiento

Tabla 17: Valor relación Sa/g

Tabla 18: Factor de zona tipo de tanque

Tabla 19: Valor relación Sa/g impulsivo convectivo

Tabla 20: Factor de reducción de respuesta

Tabla 21: Presupuesto sin incluir licencias

Tabla 22: Presupuesto incluyendo licencias

11.3 ÍNDICE DE FUNCIONES NASTRAN Y PATRAN

math_exp (value)

Description:

Return power function of natural logarithm base, e to the x power.

Input:

REAL value The raising power

Output:

REAL <Return The result of the power of the input argument.
Value>

math_sqrt (value)

Description:

Return square root of the argument.

Input:

REAL value The value for which to obtain the square root.

Output:

math_csr (angle)

Description:

Return trigonometric cosine value of the argument specified in radians.

Input:

REAL angle The angle in radians for which to compute the cosine.

Output:

REAL <Return The cosine value.
Value>

Error Conditions:

None.

math_In (value)

Description:

Return natural logarithm of the argument.

Input:

REAL value The value for which to obtain the natural logarithm.

Output:

REAL <Return The natural logarithm.
 Value>

Error Conditions:

None.